

BENTU Energy Srl

Parco Eolico BENTU sito nel Comune di Thiesi

Relazione Geotecnica

Agosto 2022

Regione autonoma della Sardegna



Comune di Thiesi



Committente:

BENTU Energy Srl

BENTU Energy Srl

Via Sardegna, 40
00187 Roma
P.IVA/C.F. 15802451003

Titolo del Progetto:

Parco Eolico BENTU sito nel Comune di Thiesi

Documento:

Relazione Geotecnica

N° Documento:

IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20



**Studio Tecnico di Geologia
Applicata all'Ingegneria e
all'Ambiente**

Centro Direzionale "Pittarello"
Loc. Scala Sa Perda, 87
09028 Sestu (CA)
T +39 070 734 6008
Mob +39 345 788 2814
e-mail: info@gaiac consulting.eu

Progettista:

Dott. Geol. Cosima Atzori



Cosima Atzori

Rev	Data Revisione	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
00	10.08.2022	Prima emissione	Cosima Atzori		

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 3 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

Sommario

1. Premessa	6
2. Normativa di riferimento	6
3. Studio e indagini di riferimento	6
4. Inquadramento geografico generale	7
5. Caratteristiche di progetto dell'opera	13
6. Inquadramento geologico	15
6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento	15
7. Analisi qualitativa di stabilità dell'ammasso roccioso	19
10.1. Caratteristiche delle acque sotterranee	20
10.2. Analisi della vulnerabilità degli acquiferi	23
8. Indagini geognostiche	24
15.2.3. Interpretazione dei segnali acquisiti	29
15.3.5. Elaborazione dei dati e software	31
15.4. Risultati delle indagini del sito SMT01 (AG02)	32
15.4.1. Masw SMT01	32
15.4.2. Rifrazione SMT01 e Tomografia elettrica SMT01	33
15.5. Risultati delle indagini del sito SMT02	36
15.5.1. Masw SMT02	36
15.5.2. SMT02: Rifrazione e Tomografia elettrica	37
15.6. Risultati delle indagini del sito SMT03	40
15.6.1. Masw SMT03	40
15.6.2. Rifrazione SMT03	41
9. Modellazione geologica	49
16.1. Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi	49
10. Modello geologico di sito	56
11. Descrizione dell'opera di fondazione degli aerogeneratori	58
12. Azioni e resistenze nelle verifiche agli stati limite	59

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 4 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

13. Verifiche di sicurezza (§c6.4.2)	60
Verifiche di sicurezza agli SLU di tipo geotecnico (GEO) (§C6.4.2.1).....	60
Verifiche di esercizio (SLE) (§C6.4.2.2).....	61
14. Condizioni di carico delle fondazioni degli aerogeneratori	61
15. Modelli geotecnici di riferimento per le verifiche	61
1. Modello Geotecnico 01	62
16. FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6)	65

Indice delle figure

Figura 1 Localizzazione del progetto	7
Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione NW	9
Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione SW	10
Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000	11
Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio.....	12
Figura 6 Schema tettonico-strutturale della Sardegna.....	15
Figura 7 Particolare della litologia appartenente all'unità di Uri	16
Figura 8 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione.....	20
Figura 9 A sinistra parete esposta a Sud situata tra la AG02 e la AG03, a destra lo schema del ribaltamento di blocchi per scalzamento alla base	20
Figura 10 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo.....	22
Figura 11 Ubicazione degli stendimenti	25
Figura 12 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m	26
Figura 13 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	33
Figura 14 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	37
Figura 15 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	41
Figura 16 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia	50
Figura 17 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso.....	50
Figura 18 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia.....	51
Figura 19 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.	52
Figura 20 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S1	53
Figura 21 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S2	54
Figura 22 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S3	54
Figura 23 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S4	55

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 5 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

Figura 24 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S555

Figura 25 - Caratteristiche geometriche della fondazione58

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 6 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

1. Premessa

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "BENTU" dislocato nel territorio comunale di **Thiesi** - Provincia di Sassari (SS), al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta la presente **Relazione Geotecnica** la cui stesura ottempera quanto previsto dal D.M. del 17/01/2018 recante le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC), con l'obiettivo di evidenziare, le caratteristiche geologico-morfologiche e il comportamento fisico-meccanico dei terreni interessati dalle opere in progetto attraverso:

1. La caratterizzazione geotecnica preliminare del modello geologico di sito;
2. L'analisi dell'interazione opera-terreno nel volume significativo in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di imposta, in relazione alla generica tipologia di fondazioni previste e le potenziali interazioni con le dinamiche di circolazione sotterranea eventualmente esistenti.
3. La valutazione preliminare della portanza dei terreni e l'indicazione delle indagini da realizzarsi in fase esecutiva necessarie alla determinazione dei parametri geotecnici specifici per ogni sito.

2. Normativa di riferimento

La presente relazione è redatta in osservanza a quanto stabilito dalla vigente normativa in materia, con particolare riferimento a:

1. D.M LL.PP. 11.03.1988 "Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii attuali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione in applicazione della Legge 02.02.1974 n°64.
2. Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
3. Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
4. D.M. Infrastrutture 17.01.2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. (6.2.1 – Caratterizzazione e modellazione geologica del sito, 6.4.2 Fondazioni superficiali)
5. Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 21.01.2019 n°7 – Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17.01.2018.
6. D.L. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni - "Norme in materia ambientale".

3. Studio e indagini di riferimento

Le informazioni topografiche e geologiche dell'area oggetto della presente sono state ricavate dalle pubblicazioni ufficiali e cartografia tematica esistente. Si elencano di seguito:

7. Carta Topografica I.G.M. scala in 1:25000
8. Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000
9. Carta Geologica dell'Italia in scala 1:100000
10. Carta Geologica dell'Italia in scala 1:50.000 (CARG).
11. Cartografia Geologica di base della R.A.S. in scala 1:25.000
12. RAS - Carta dell'Uso del Suolo della Regione Sardegna, 2008
13. I.S.P.R.A. - Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (legge 464/84)
14. RAS – Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, annali idrologici 1922-2009
15. RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico
16. RAS – Autorità di Bacino - Piano di Tutela delle Acque
17. RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio delle Fasce Fluviali
18. Foto aeree, Regione Sardegna

I dati a disposizione sono stati integrati con le informazioni derivanti dai sopralluoghi effettuati dalla scrivente in sito e dagli esiti della campagna di indagini geognostiche eseguite rispettivamente in data 09/03/2022 e 04-16-23/05/2022 nella zona di interesse.

4. Inquadramento geografico generale

L'aggettivo *tiesu* significa disteso: non a caso, il suo abitato si adagia su un pianoro alle pendici dell'altopiano *su Montiju*. Thiesi è un centro di tremila abitanti del *Meilogu*, a 40 chilometri da Sassari, fondato, secondo alcune fonti, da ebrei deportati dai romani.

L'impianto urbano si è sviluppato in due aree: attorno alla seicentesca chiesa di sant'Antonio e attorno alla parrocchiale di santa Vittoria, bell'edificio gotico-aragonese costruito fra 1400 e 1590, con decorazione interna e portale rinascimentali. In origine la forma del paese era a triangolo con ai vertici altre tre chiese: san Sebastiano, san Giovanni, immersa nella rigogliosa vallata *Badde Serena* (e raggiungibile da una scala in pietra) e il santuario della Madonna di *Seunis*, in periferia, costruita nel Settecento (poi rimaneggiata) su uno spuntone roccioso che domina la valle del rio *Molinu*.

A dieci chilometri dal paese, si trova la necropoli di *Mandra Antine*: quattro *domus de Janas* ricavate in un costone trachitico. Spicca la tomba III detta 'dipinta' per i raffinati e variopinti affreschi all'interno: è una delle eredità più sorprendenti del Neolitico sardo (III millennio a.C.).

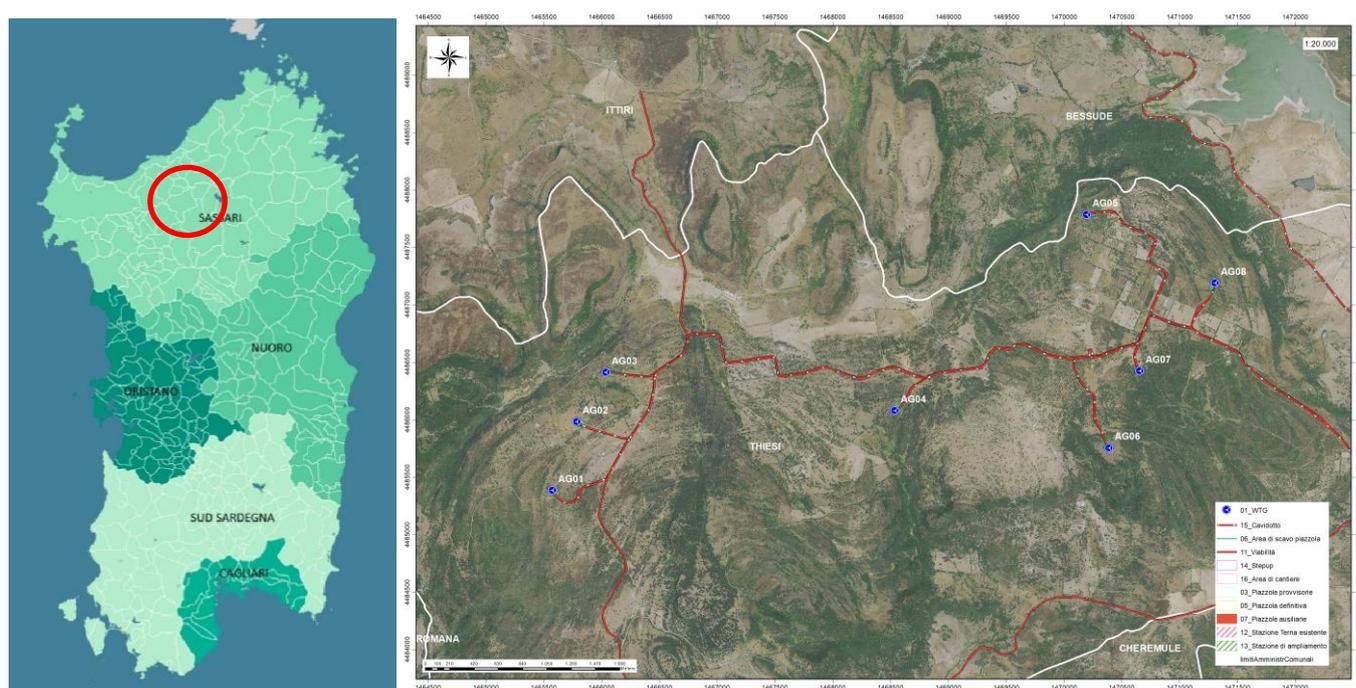


Figura 1 Localizzazione del progetto

Fuori dal paese anche il protonuraghe *Fronte 'e Mola*. È uno dei circa 350 nuraghi del *Meilogu*, territorio che ti conquisterà anche con particolarità naturalistiche, come i cono vulcanici spenti che si ergono isolati: il colle *santu Bainzu* di Thiesi è uno dei cinque crateri vulcanici del *Meilogu*, affascinante monumento naturale protetto, che crea un paesaggio insolito e unico. Altro emergenza naturalistica è la grotta di monte *Majore*, che si apre con un ampio ingresso nel versante orientale del monte.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 8 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

1. Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **479 sez. I** "Ittiri"
2. Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: **479080** "Monte Cheia" e **479040** "Diga 'e su Bidighinzu".

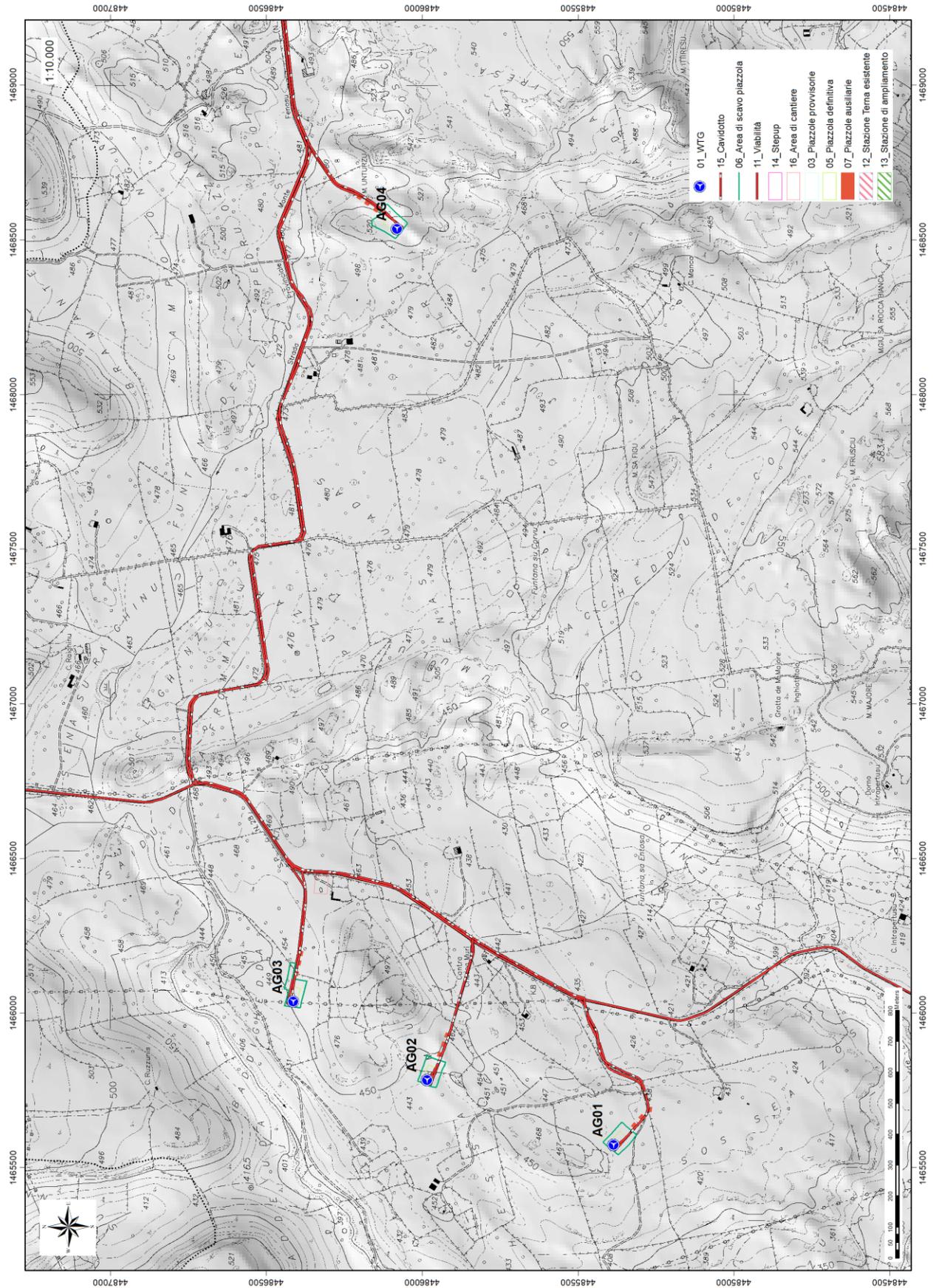


Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione NW

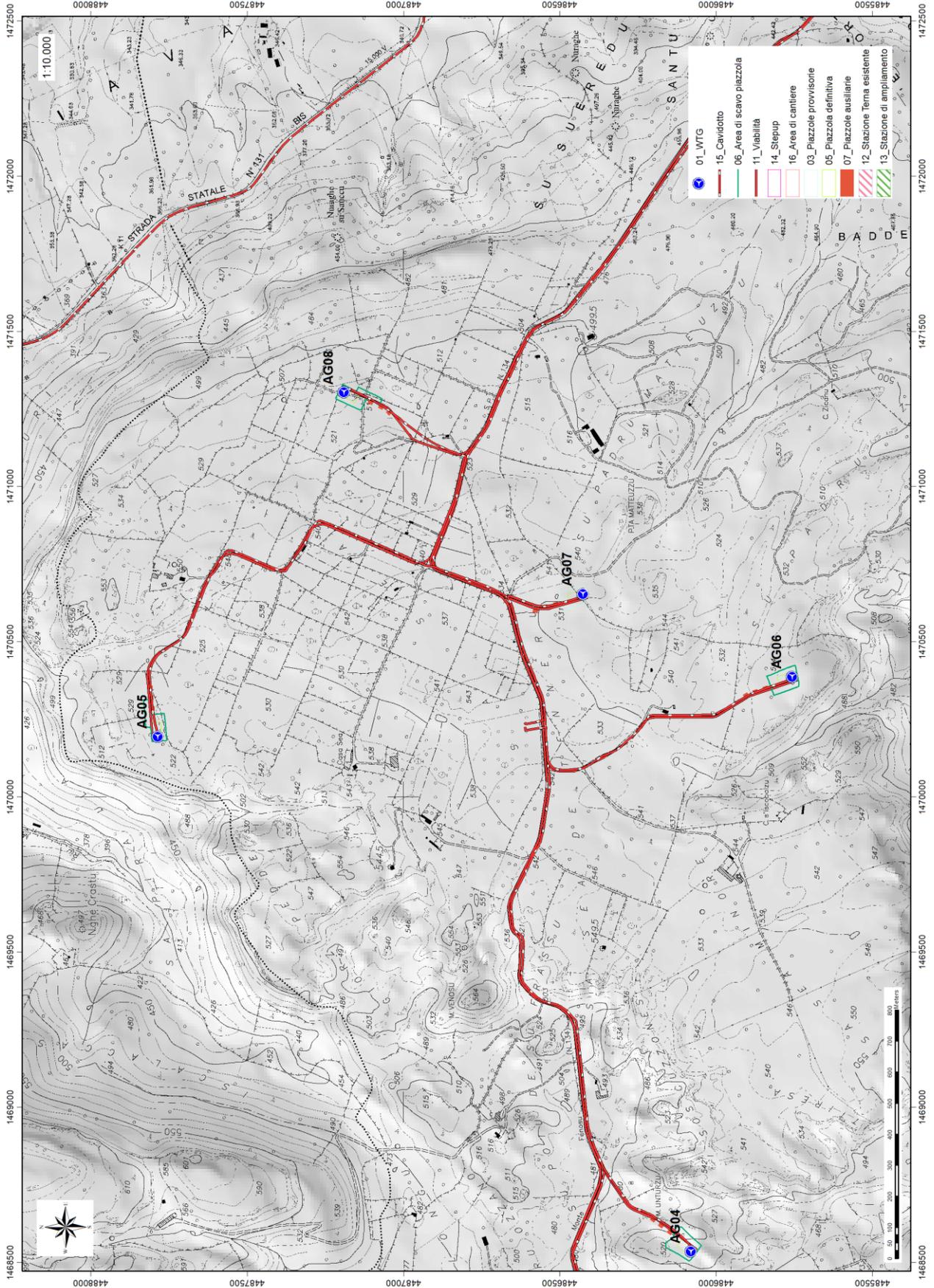


Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione SW

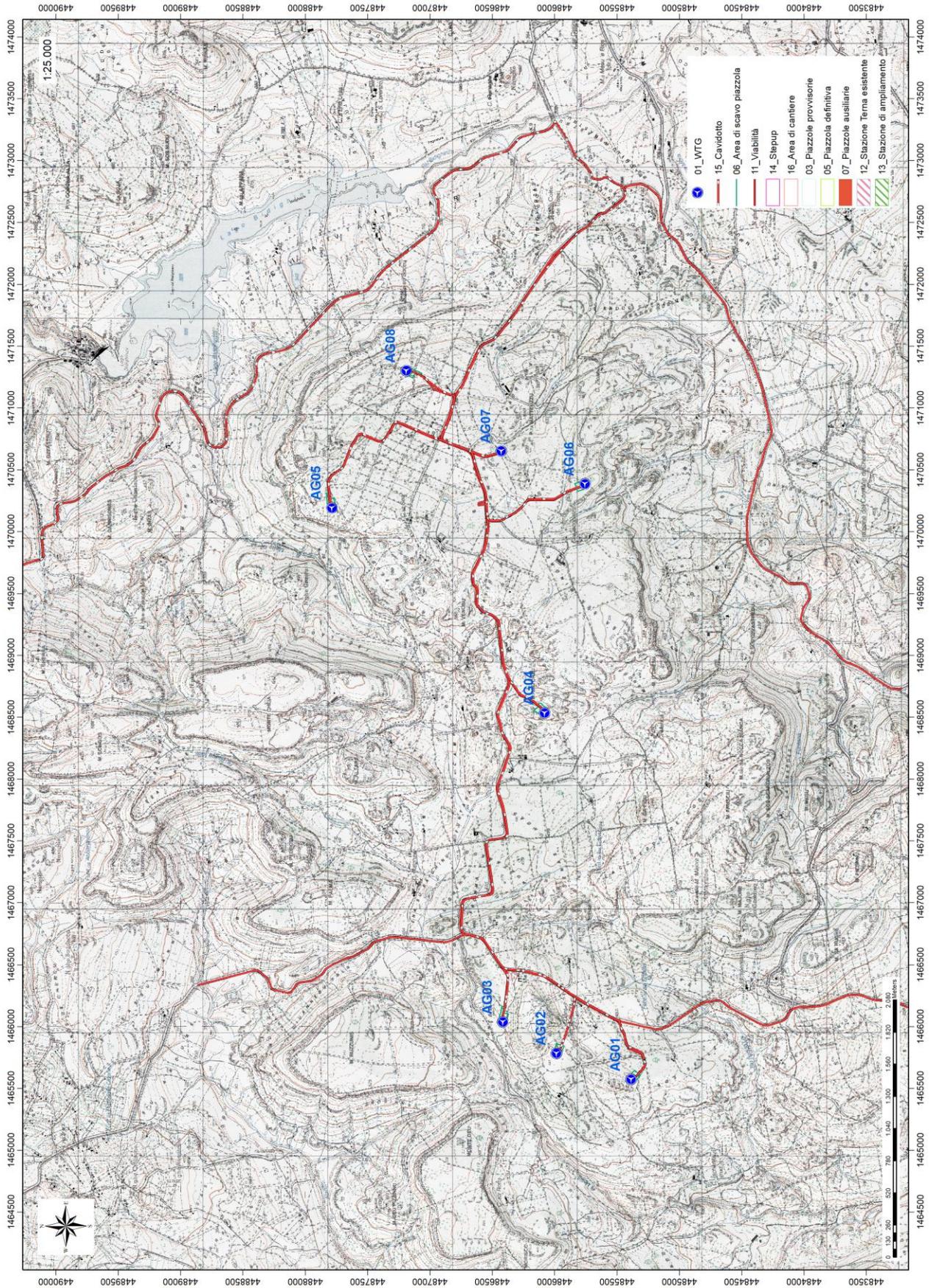


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000



Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio

5. Caratteristiche di progetto dell'opera

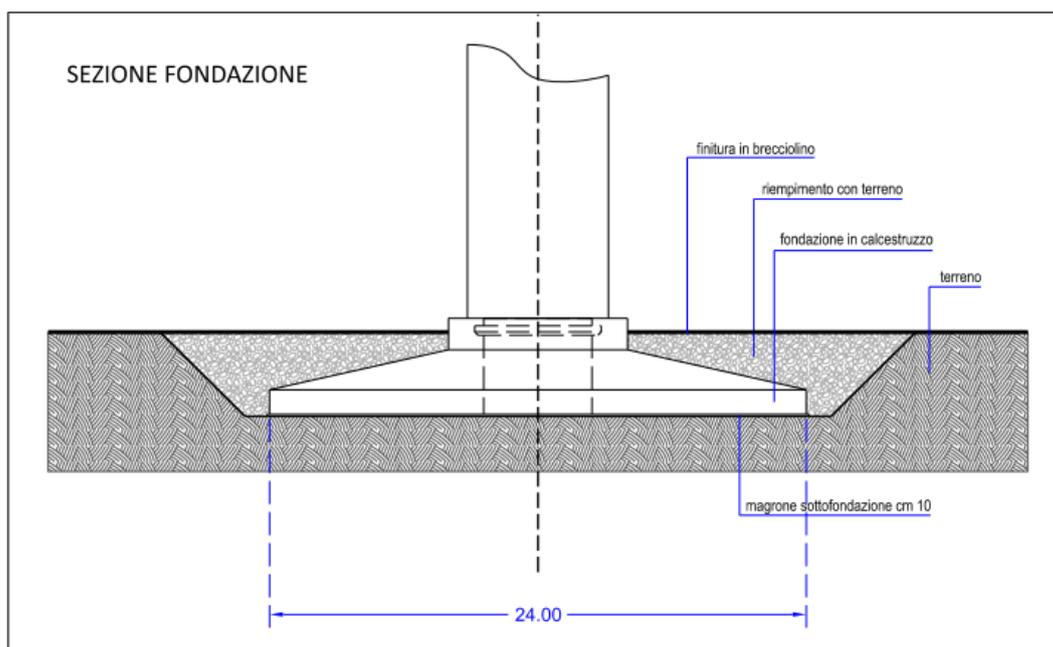
Il Parco Eolico è costituito da 8 aerogeneratori ad asse orizzontale montati su torri tubolari ad elementi in acciaio; il modello adottato è il V162 da 6,0 MW prodotto dalla fabbrica VESTAS, ormai collaudato con risultati altamente prestazionali. Questi sono posizionati ad una distanza mediamente tra di loro pari a 6 volte il diametro del rotore, nel senso del vento dominante proveniente dal quadrante nordovest, e 3,5 volte il diametro del rotore, in senso perpendicolare alla direzione del vento dominante.

La potenza nominale del parco eolico installata è pari a 48 MW. Con un vento medio annuale di 6.22 m/s e un funzionamento annuale previsto pari a circa 2.795 ore equivalenti la produzione di energia elettrica lorda stimata è di circa 138.906 MWh/anno.

Le caratteristiche tecniche degli aero-generatori e del parco sono le seguenti:

1. generatori asincroni trifase con potenza nominale pari a 6,0 MW, tensione 3 X 0.96 Kv, freq. 50 Hz
2. rotor a tre pale con diametro pari a 162 m;
3. torri in acciaio a sviluppo tronco conico di altezza pari a 125 m;
4. cabine elettriche secondarie di trasformazione inserite in ogni aerogeneratore;
5. rete elettrica interrata MT a 30 KV dai singoli aerogeneratori alla sottostazione di trasformazione MT/AT;
6. sottostazione di trasformazione MT/AT (Media Tensione 30 kV - Alta Tensione 150 kV), comprendente sezionamento, ricezione e smistamento;
7. rete telematica interrata per il monitoraggio e controllo dell'impianto;
8. connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) in alta tensione 150 KV.

Le fondazioni delle torri saranno costituite da piastre in cemento armato atte a ripartire sia le azioni statiche dovute al peso proprio dell'apparato eolico che le azioni dinamiche dovute al vento trasmesse alla base delle torri dagli "apparati eolici". Da un predimensionamento di massima risulta che per terreni sufficientemente portanti ($\sigma > 1 \text{ N/mm}^2$), dovranno realizzarsi fondazioni a platea di forma circolare aventi un raggio di 12 m e un'altezza complessiva di 4.00 m



Schema di fondazione

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 14 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

In caso di terreni dalle caratteristiche meccaniche scarse, si realizzeranno delle platee su pali di grande diametro (cm 100) disposti su tutta l'area di base atti a garantire adeguata stabilità al sistema fondazione-terreno.

Le fondazioni saranno interrato e ricoperte da uno strato di terreno dello spessore di circa m 1.

L'utilizzo di una tipologia o di un'altra scaturirà dalle indagini geotecniche derivanti dai sondaggi previsti in fase esecutiva in corrispondenza di ogni aerogeneratore.

Il volume di scavo della fondazione per ogni aerogeneratore è di circa 2260 mc.

In caso di terreni dalle caratteristiche meccaniche scarse, si realizzeranno delle platee su pali di grande diametro (cm 100) disposti su tutta l'area di base atti a garantire adeguata stabilità al sistema fondazione-terreno.

Le fondazioni saranno interrato e ricoperte da uno strato di terreno dello spessore di circa m 1.

L'utilizzo di una tipologia o di un'altra scaturirà dalle indagini geotecniche derivanti dai sondaggi previsti in fase esecutiva in corrispondenza di ogni aerogeneratore.

Il volume di scavo della fondazione per ogni aerogeneratore è di circa 2260 mc.

Il basamento di fondazione previsto in progetto è del tipo a plinto superficiale, da realizzare in opera in calcestruzzo armato, a pianta circolare di diametro pari a 25 metri.

La fondazione oggetto di verifica è sostanzialmente una piastra circolare a sezione variabile con spessore massimo al centro, pari a circa 350 cm, e spessore minimo al bordo, pari a 50 cm.

La porzione centrale, denominata "colletto", presenta altezza costante di 3,50 m per un diametro pari a circa 6.00 m.

Il colletto è il nucleo del basamento in cui verranno posizionati i tirafondi di ancoraggio del primo anello della torre metallica, il restante settore circolare sarà ricoperto con uno strato orizzontale di rilevato misto arido, con funzione stabilizzante e di mascheramento.

6. Inquadramento geologico

L'obiettivo dell'analisi dell'assetto geologico è quella di caratterizzare geologicamente l'area ove verrà installato il parco eolico e quella geomorfologicamente significativa, con particolare riferimento alle condizioni del substrato roccioso di fondazione, agli scavi ed ai riporti necessari per la realizzazione del sistema di fondazione e delle sue potenziali interazioni con le condizioni al contorno (dinamica geomorfologica, circolazione idrica superficiale e sotterranea, rapporti fra le componenti litologiche interessate) attraverso:

1. Definizione dell'assetto geologico-strutturale e idrogeologico di area vasta e dell'area geomorfologicamente significativa;
2. Definizione dell'assetto stratigrafico dell'area di sedime delle opere;
3. Definizione del modello geologico di sito;

6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento

L'area di studio ricade nella zona costituita dalla copertura sedimentaria e vulcanica post-ercinica; principalmente è costituita dalle coperture sedimentarie mioceniche, dalle rocce della successione vulcano-sedimentaria Miocenica, e dai depositi quaternari. In particolare, l'area vasta è compresa all'interno *Distretto vulcanico di Capo Marargiu*, del *Distretto vulcanico di Osilo Castelsardo* e della *Successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese*.

6.2. Successione litostratigrafica dell'area di intervento

La successione vulcanica oligo-miocenica affiorante nell'area di interesse è costituita da ammassi lavici, duomi e piroclastiti messi in posto in condizioni subaeree e da subordinate epiclastiti.

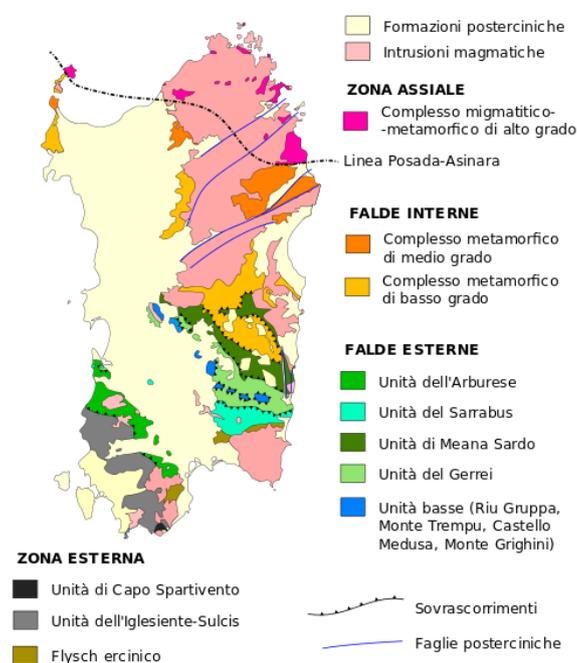


Figura 6 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

6.2.1. Distretto vulcanico di Capo Marargiu (Miocene Inferiore)

(MTD) Unità di Pala Mantedda: è costituita da un'alternanza di colate e duomi a chimismo da andesitico a dacitico, per uno spessore di circa un centinaio di metri. Le lave, talora scoriacee, hanno tessitura porfirica per fenocristalli di plagioclasio e clinopirosseno, immersi in una pasta di fondo vetrosa. Le colate, spesso separate tra loro da livelli conglomeratici, presentano porzioni autoclastiche nelle parti basali, e laminazioni di flusso in quelle centrali. Aquitaniano.

(LGS) Unità di Monte Longos: è rappresentata da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, pomiceo-cineritici, saldati, di colore nerastro o violaceo alla base. I depositi si presentano ben saldati, con aspetto vetroso e ricchi in cristalli di plagioclasio, pirosseno e biotite, e rare fiamme di colore nero. I depositi hanno chimismo riolitico, e spessore minimo di 5 m. Al contatto con le sottostanti piroclastiti (UUI) sono presenti alcuni livelli centimetrici di ceneri di caduta, con pomice e litici. Burdigaliano.

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 16 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

(UUI) Unità di Uri: è costituita da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, variamente saldati, di colore grigiastro e subordinatamente rossastro per alterazione, ricchi in frammenti litici e cristalli liberi. Il deposito piroclastico è costituito da pomici biancastre e litici eterometrici (4-5 cm) di natura andesitica o ignimbratica, in matrice cineritica grossolana nella quale sono immersi anche cristalli di plagioclasio, pirosseno e biotite. Il diverso grado di saldatura varia dalla base (nullo) verso il tetto della successione (elevato), influenza la tessitura della roccia, che si presenta debolmente isoorientata nei termini poco saldati, mentre è marcatamente eutassitica nei termini saldati. La composizione delle piroclastiti è riolitica, e lo spessore varia da pochi metri fino a 30 m. Le datazioni radiometriche ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Gattacecca et al., 2007) indicano un'età di $18,95 \pm 0,07$ (Burdigaliano).



Figura 7 Particolare della litologia appartenente all'unità di Uri

(UNV) Unità di Nuraghe Vittore: è costituita da colate di andesiti basaltiche e basalti, con caratteristiche prevalenti di autobrecce, e daciti porfiriche. Le lave coerenti hanno colore grigio scuro e tessitura porfirica per fenocristalli di plagioclasio, pirosseno e olivina in pasta di fondo microcristallina. Presentano frequente fratturazione tipo *platy jointing* secondo la direzione di flusso. Le lave a blocchi sono costituite da blocchi irregolari e eterometrici di lava, debolmente vescicolati, a tessitura clasto-sostenuta, con arrossamento dovuto ad alterazione idrotermale. I rapporti con le piroclastiti a contatto a letto (SSU) e a tetto (UUI) sono caratterizzati da disconformità. Burdigaliano inferiore.

(MLO) Unità di Villanova Monteleone: sono costituiti da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, a chimismo rioidacitico, da saldati a mediamente saldati, con strutture vitroclastiche e/o eutaxitiche, e cristalli liberi di plagioclasio, sanidino, clinopirosseno, anfibolo, biotite e rare olivine. Burdigaliano.

(OMN) Unità di Romana: rappresentata da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica a chimismo rioidacitico, pomiceo-cineritici, mediamente saldati, ricchi in pomici e cristalli liberi di Pl, San, Bt, e subordinato Px.

(SSU) Unità di Su Suerzu: rappresentati da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, saldati, e con tessitura paratassitica, di colore rossastro, con fiammae grigiastre di dimensioni comprese tra 2 cm e 20 cm, e litici centimetrici costituiti da altre ignimbriti o da andesiti. Nell'area a est di Thiesi è presente un prodotto di aspetto ossidianaceo, probabilmente originato dalla silicizzazione di una piroclastite, di colore grigio da chiaro a scuro, con spessore limitato (7-8 m), preceduto da cineriti bianche contenenti frustoli carboniosi e litici e lapilli accrezionali. I

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 17 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

depositi di Su Suerzu sono delimitati dalle Lave di Pala Mantedda (MTD) a letto, e dai corpi di Nuraghe Vittore (UNV) a tetto, con rapporti di disconformità. La composizione chimica delle ignimbriti è riodacitica, mentre lo spessore varia tra 15-20 m fino a 70 m. Burdigaliano.

6.2.2. Distretto Vulcanico di Osilo-Castelsardo (Miocene Inferiore)

(ILV) Unità di Monte sa Silva: sono costituiti da piroclastiti di flusso pomiceo-cineritiche, di colore bianco-grigiastro, non saldate, ricche di fenoclasti (plagioclasio, quarzo, biotite), con litici di vulcaniti di dimensioni da 3 a 10 cm, e pomici di dimensioni variabili tra il centimetro e 5 cm. Le piroclastiti sono prevalentemente massive, con rari livelli grossolanamente stratificati per effetto della concentrazione dei litici. Il chimismo dei depositi è riolitico, e lo spessore varia da 10 fino a 100 m. L'età radiometrica determinata col metodo $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ (progetto CARG) è di $18,61 \pm 0,23$ Ma. Burdigaliano.

6.3. Successione sedimentaria Oligo-Miocenica del Logudoro-Sassarese

La successione sedimentaria miocenica affiorante nell'area di interesse è caratterizzata dalla presenza di due sequenze deposizionali limitate da discordanze riconoscibili a scala bacinale. Il substrato di questi depositi è costituito da vulcaniti ed epiclastiti di età compresa tra i 23 e i 18 Ma.

La prima sequenza deposizionale è costituita da depositi continentali fluviali e di piana alluvionale, deltizi e marini di piattaforma, mentre la seconda sequenza è costituita da depositi fluvio-marini e carbonatici di piattaforma.

(RESa) Litofacies nella Formazione di Mores: nota come "calcarei inferiori", è costituita da una successione di calcareniti, calcari bioclastici fossiliferi, e calcari a componente terrigena variabile, con faune a gasteropodi "Turritelle", ostreidi ed echinidi (Scutella, Amphiope), riferibili al Miocene inferiore (Burdigaliano). Il passaggio alla soprastante formazione di Borutta (RTU) presenta spesso caratteri eteropici, infatti può esser sormontata direttamente dalla Formazione di Monte Santo (NST). Burdigaliano superiore.

(RTU) Formazione di Borutta: si tratta di una successione di marne, marne arenacee bioturbate, calcari marnosi e siltiti, localmente in alternanze ritmiche, di colore da grigio-bruno a biancastro-giallastro. Tali depositi, il cui spessore varia tra 100 e 200 m, presentano contatto superiore eteropico con le arenarie della formazione di Florinas, oppure direttamente con i calcari della Formazione di Monte Santo (NST). Il contenuto fossilifero abbondante, costituito da echinidi, bivalvi, gasteropodi, pteropodi, foraminiferi planctonici e ostracodi, permette di riferire i depositi di questa formazione al Burdigaliano superiore - Langhiano.

(TLR) Unità di Chelchedu-Tiloromo. Andesiti e andesiti basaltiche in cupole di ristagno, ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Ol, Cpx; intercalate e/o iniettate entro i depositi piroclastici dell'unità UUI.

Formazione del Rio Minore. Depositi epiclastici con intercalazioni di selci, siltiti e marne con resti di piante, conglomerati, e calcari silicizzati di ambiente lacustre ("Formazione lacustre" Auct.). Burdigaliano

(FSI) Unità di Monte Frusciu. Daciti ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Sa, Bt, Am, Mag; in cupole di ristagno e locali versamenti laterali. (K/Ar $17,5 \pm 0,5$ Ma: Lecca et alii, 1997), ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ bt: $18,48 \pm 0,18$ Ma: Progemisa S.p.A.

(NST) Formazione di Monte Santo: è costituita da una successione di calcari bioclastici di piattaforma interna, con rare intercalazioni silicoclastiche ed episodi biohermali, e calcareniti. Poggiano eteropicamente sopra la Formazione di Florinas, quella di Borutta (RTU) o sulle vulcaniti. Gli affioramenti che poggiano sulla Formazione di Florinas sono costituiti da *grainstone* con stratificazione incrociata o clinoforni, ricche in alghe calcaree (*Rodophyllum*,

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 18 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

Lithophyllum) e coralli (*Tarbellastrea*, *Porites*), con accumuli di *algal ball*, gasteropodi, lamellibranchi, echinidi, macroforaminiferi. Quando poggia sulle marne della Formazione di Borutta (RTU), il passaggio avviene in giacitura caotica ed erosiva, con slumping e megabrecce. Lo spessore è variabile, con un massimo di 50 m. L'associazione fossilifera permette di riferire tali depositi al Serravalliano - Tortoniano.

6.4. Depositi Quaternari dell'area continentale

I depositi quaternari cartografati nell'area di studio sono generalmente poco rilevanti; sono rappresentati principalmente da depositi alluvionali, depositi di versante e sedimenti legati a gravità.

(PVM2a) Litofacies nel Subsistema di Portovesme: si tratta di depositi di ghiaie e alluvioni terrazzate, da medie a grossolane, con subordinate sabbie. Pleistocene superiore.

(a) Depositi di versante: sono costituiti da detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Olocene.

(a1a) Sedimenti legati a gravità: sono costituiti di frana, e rappresentano corpi di frana antichi accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Olocene.

Tutte le turbine ricadono nell'Unità di Monte Frusciu, appartenente al distretto vulcanico di Capo Marargiu

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 19 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

7. Analisi qualitativa di stabilità dell'ammasso roccioso

L'area di studio è caratterizzata dall'affioramento delle rocce sedimentarie e vulcaniche del Miocene e dai depositi quaternari.

I depositi sedimentari miocenici sono costituiti da diverse facies composizionali che vanno dai termini carbonatici alle arenarie, mentre le coperture vulcaniche sono costituite prevalentemente da espandimenti lavici e ignimbriti.

I depositi quaternari sono principalmente costituiti da depositi alluvionali e depositi di versante.

L'area vasta è caratterizzata da diverse faglie a direzione NW-SE (settore centro-orientale dell'area vasta) e alcune a direzione NE-SW (nel settore occidentale dell'area vasta).

Di queste strutture tettoniche presenti, le faglie determinano il controllo tettonico delle principali valli incise. La giacitura dei piani è abbastanza costante, sebbene possa esser influenzata dalle faglie. Una faglia principale a direzione NW-SE separa il settore ovest (con le turbine AG01, AG02 e AG03), dal settore est, nel quale ricadono le turbine AG04, AG05, AG06, AG07 e AG08. Nei diversi siti di installazione la dinamica geostrutturale ha creato piani di fratturazione a diversa scala. I movimenti tettonici hanno fratturato i materiali affioranti.

Tutte le stazioni eoliche sono posizionate nella copertura vulcanica miocenica del Distretto vulcanico di Capo Marargiu (Unità di Monte Frusciu – FSI)

L'intensa fratturazione produce sulla roccia una geometria estremamente variabile in termini di direzione e immersione, nelle tre direzioni principali dello spazio. Ciò che varia in relazione alla composizione granulometrica dei singoli strati originari è la spaziatura tra i giunti e il grado di fissilità. Pertanto è estremamente difficile se non impossibile definire l'assetto a piccola scala per quanto appena descritto.

Si può definire un range di spaziatura alla mesoscala, tale da individuare una potenziale compagine di blocchi in grado di staccarsi dall'ammasso se le condizioni geostrutturali lo permettono (piani a franapoggio o intersezione di piani con direttrice a franapoggio).

Tali dimensioni possono essere individuate tra il decimo di metro cubo a qualche metro cubo. La variabilità direzionale delle famiglie di giunti che individuano i blocchi è piuttosto marcata e diversificata in funzione, come detto della competenza degli strati soggetti agli sforzi.

Ne deriva di fatto, una difficile previsione delle potenziali propensioni a fenomeni di crollo e/o scivolamento, ma si tratta di caratteri locali la cui eteropia laterale risulta sempre molto marcata.

In generale si può affermare che versanti come questi sono oggetto di due fenomeni di scivolamento distinti in relazione al dominio di famiglie di giunti.

Alla piccola scala laddove il materiale originario è costituito da granulometrie medie e fini, sono più frequenti fenomeni di sfaldamento e distacco di lamine da centimetriche a decimetriche. Queste ultime divengono più simili a piccoli blocchi là dove la granulometria aumenta.

A scala media difatti, le spaziature nella stessa famiglia sono maggiori, anche oltre metro ed interessano blocchi più grandi ma che rispondono alle medesime dinamiche di quelli pocanzi analizzati.

Di fatto quindi, non potendo generalizzare alla piccola scala è sempre d'obbligo un rilievo puntuale sugli affioramenti ove possibile. Il materiale distaccato si raccoglie ai piedi del pendio, in accumuli più o meno estesi in funzione della pendenza.

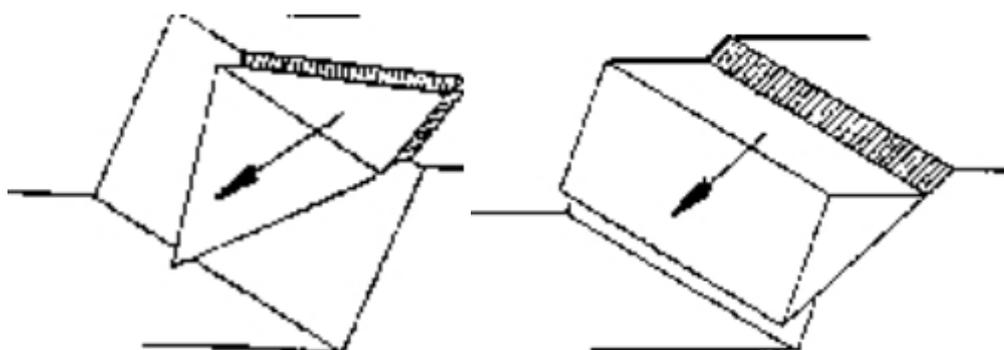


Figura 8 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

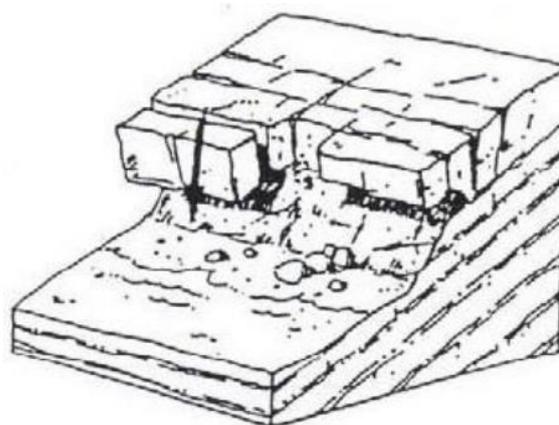


Figura 9 A sinistra parete esposta a Sud situata tra la AG02 e la AG03, a destra lo schema del ribaltamento di blocchi per scalzamento alla base

Nella foto soprastante viene illustrata una parete affiorante appartenente alla Formazione di Mores caratterizzata da stratificazione a giacitura orizzontale, questa è soggetta ad erosione differenziale in strati meno competenti, ciò comporta uno scalzamento alla base con conseguente distacco di blocchi nei livelli soprastanti più competenti ma fratturati; ai piedi sono presenti blocchi distaccatisi tendenzialmente per crollo/ribaltamento.

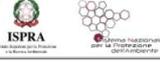
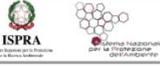
Gli ammassi rocciosi costituiti in litologie dacitiche, ovvero quelle su cui pogeranno tutte le turbine, presentano le medesime caratteristiche per quanto riguarda instabilità, ovvero tendono a formare scarpate che arretrano per crollo ribaltamento e per scivolamento planare o di cunei. La differenza con le formazioni carbonatiche sopra citate sta nella natura dei giunti, ovvero, mentre nelle prime sono dovuti anche a stratificazione, in queste ultime sono di tipo *platy joints*, presentano in ogni caso una forte regolarità anche alla scala dell'ammasso, è pertanto prevedibile, almeno in parte, come vari la stabilità dell'ammasso al variare dell'orientazione e della pendenza del versante.

10.1. Caratteristiche delle acque sotterranee

Uno studio idrogeologico ha lo scopo di identificare lo schema di circolazione idrica sotterranea relativo ad una determinata area per poter ricavare informazioni circa i rapporti tra litotipi presenti, la presenza di acqua e le possibili conseguenze derivanti dalla realizzazione di un'opera.

Le rocce si presentano raramente compatte. La proprietà di contenere spazi vuoti tra gli elementi solidi che le compongono, detta porosità, esprime l'attitudine che ha la roccia ad immagazzinare ed a liberare acqua sotterranea.

Le litologie che circondano l'area di studio sono caratterizzate da permeabilità medio-bassa per fratturazione (Daciti). Da un censimento nell'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo ex Lg 464/1984 non sono presenti perforazioni per uso di acque sotterranee nell'area di interesse. Nelle immagini seguenti le schede di un pozzo (Cod.176535) nei pressi delle turbine AG01 e AG02 (immagine a sinistra) e di un pozzo (Cod.170169) situato nei pressi dell'area di installazione della turbina AG08 (immagine a destra).

 Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale		 Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale			
Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)					
Dati generali Codice: 176535 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: THIESI Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 110,00 Quota pc slm (m): 454,00 Anno realizzazione: 1996 Numero diametri: 0 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): 0,040 Portata esercizio (l/s): 0,020 Numero falde: 1 Numero filtri: 0 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: SI Certificazione(*): SI Numero strati: 3 Longitudine WGS84 (dd): 8.590981 Latitudine WGS84 (dd): 40.523731 Longitudine WGS84 (dms): 8° 35' 27.53" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 31' 25.43" N (*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia		Ubicazione indicativa dell'area d'indagine 			
FALDE ACQUIFERE					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)		
1	80,00	105,00	25,00		
MISURE PIEZOMETRICHE					
Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)	
mag 1996	64,00	ND	ND	ND	
STRATIGRAFIA					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Spessore (m)	Età geologica	Descrizione litologica
1	0,00	0,60	0,60	ATTUALE	TERRENO AGRARIO
2	0,60	95,00	94,40	PRE-ELVEZIANO	TRACHIDADICI
3	95,00	110,00	15,00	PRE-ELVEZIANO	VITROTRACHIANDESITI (IGNIMBRITI)

 Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale		 Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale		
Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)				
Dati generali Codice: 170169 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: BESSUDE Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 150,00 Quota pc slm (m): 366,00 Anno realizzazione: 2001 Numero diametri: 1 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): 3,000 Portata esercizio (l/s): 0,003 Numero falde: 1 Numero filtri: 0 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: NO Certificazione(*): NO Numero strati: 0 Longitudine WGS84 (dd): 8.659869 Latitudine WGS84 (dd): 40.540939 Longitudine WGS84 (dms): 8° 39' 35.53" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 32' 27.38" N (*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia		Ubicazione indicativa dell'area d'indagine 		
DIAMETRI PERFORAZIONE				
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)
1	0,00	150,00	150,00	204
FALDE ACQUIFERE				
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	
1	145,00	150,00	5,00	
MISURE PIEZOMETRICHE				
Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)
giu 2001	35,00	145,00	110,00	3,000

Complessivamente, le pendenze dei versanti insieme alla bassa permeabilità di alcune litologie non sono favorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche (piroclastiti), mentre in alcune litologie (calcarei bioclastici) la permeabilità è alta per carsismo, oltre che per fratturazione. La circolazione idrica profonda è strettamente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso e alla sua permeabilità.

La permeabilità secondaria, o per fessurazione, viene acquisita dalla roccia a seguito della sua formazione. Tale proprietà può esser limitata dalla presenza di riempimento delle fratture costituito da materiali derivanti dall'alterazione della roccia madre ad alta componente argillosa. Ne consegue che seppur presente una buona rete di fratture anche con importanti spazature, la presenza di tali riempimenti limita fortemente il passaggio delle acque.

La parte superficiale dell'ammasso roccioso è generalmente più fratturata e pertanto con permeabilità più elevata rispetto alla parte più profonda meno interessata dalla fratturazione, al contatto tra le due si possono sviluppare delle risorgive che hanno carattere prettamente stagionale legato all'andamento pluviometrico generale.

Di seguito viene illustrato in uno schema il processo di infiltrazione accumulo e circolazione legato al regime delle piogge e caratterizzante le litologie vulcaniche nella porzione sommitale e di interesse alle opere del parco eolico.

Gli afflussi che arrivano sul terreno sotto forma per lo più di piogge, più raramente e poco tempo di neve, in parte scorrono lungo la superficie in genere a lamina d'acqua per poi organizzarsi in deboli rivoli che si concentrano lungo gli impluvi fino a raggiungere il bordo dell'altopiano oltre il quale si riversano lungo valli strette a V ancora in evoluzione geomorfologica.

La frazione di acqua che non scorre in superficie in parte evapora e in parte si infiltra nel terreno e nella roccia sottostante scorrendo lungo le fratturazioni in maniera più o meno efficace in funzione del grado di apertura delle stesse, e in funzione della permeabilità della roccia.

Maggiore è la presenza di fratture, maggiore è la possibilità che l'acqua prosegua il suo percorso in profondità. Le falde acquifere e le conseguenti sorgenti che si hanno lungo i versanti e nei tagli erosivi sono per l'appunto legate principalmente alla presenza dei sistemi di frattura a diversa scala e dal materiale derivante dall'alterazione superficiale degli ammassi rocciosi.

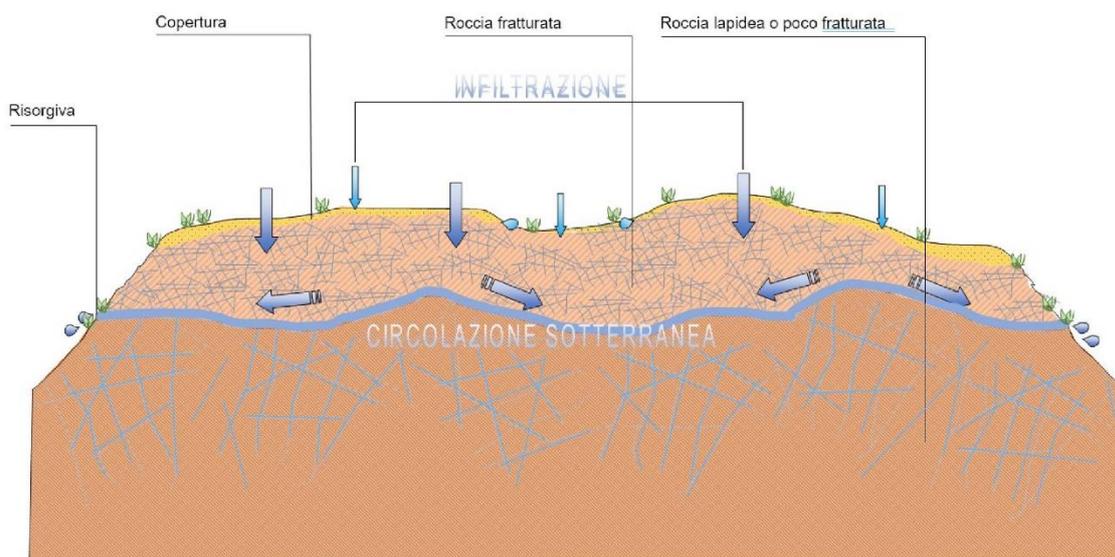


Figura 10 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo

Nell'area di studio si possono distinguere:

1. litologie con permeabilità medio-alta, come le calcareniti della litofacies della Formazione di Mores (RESa), per via della fratturazione o del carsismo;
2. litologie con permeabilità medio-bassa per fratturazione, come le rocce delle vulcaniti terziarie: Unità di Monte Frusciu (FSI) Unità di Monte Longos (LGS), di Uri (UUI), di Villanova Monteleone (MLO), di Romana (OMN), di Pala Mantedda (MTD) e di Nuraghe Vittore (UNV).

Da un punto di vista idrogeologico le formazioni dell'area di studio possono essere divise in tre gruppi principali:

1. Rocce del Distretto vulcanico di Capo Marargiu, e di Osilo. È costituito da rocce poco permeabili per fratturazione (piroclastiti, lave andesitiche, ecc...) $K=1 \times 10^{-5}$ - 1×10^{-6} m/sec
2. Coperture della successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese. Tali coperture sono costituite da litotipi a permeabilità medio-alta dovuta alla fratturazione e al carsismo delle rocce carbonatiche intercalate nelle successioni; $K= 1 \times 10^{-6}$ m/sec
3. Depositi quaternari. I depositi quaternari occupano aree molto limitate e raggiungono spessori poco significativi, la permeabilità è di tipo medio-alta per porosità. Le alluvioni terrazzate recenti hanno permeabilità medio-alta e sono di solito sede di una falda freatica di subalveo. I depositi di versante invece

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 23 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

essendo in gran parte costituiti da una struttura clasto-sostenuta e scarsa matrice (falde di detrito), presentano una permeabilità molto elevata, in ogni caso i loro spessori esigui non garantiscono una potenza sufficiente per generare acquiferi significativi; $K=1 \times 10^{-5}$ - $1 \times 10^{-6} \leq 1 \times 10^{-4}$ m/sec

Dalla carta della permeabilità dei suoli, resa disponibile dal Geoportale della Regione Autonoma della Sardegna, si evince che l'area di studio presenta nella zona di installazione delle turbine, una **permeabilità medio-bassa per fratturazione**, eccetto che per le aree in cui affiorano i depositi quaternari legati a gravità (al piede dei rilievi) che presentano permeabilità medio-alta per porosità. Nell'area del cavidotto invece la permeabilità risulta medio-bassa per fratturazione, e medio-alta per porosità.

10.2. Analisi della vulnerabilità degli acquiferi

Ai fini della tutela della risorsa idrica si è operata una valutazione qualitativa della vulnerabilità degli acquiferi presenti in relazione alle opere da realizzare e in relazione alle varie attività di cantiere.

Non sono presenti sorgenti alle quote di realizzazione delle opere che prevedono gli scavi più profondi (fondazioni degli aerogeneratori, piazzole e aree di deposito temporaneo) e la profondità dell'acquifero così come deriva dalle informazioni geologiche è tale che quest'ultimo non venga influenzato dalle opere in possesso e con il normale deflusso delle acque sotterranee. Altresì le opere in progetto non determinano per loro natura produzione di agenti inquinanti che possono riversarsi nella circolazione idrica sotterranea se non per accidentale guasto meccanico che andrà trattato con le opportune misure di salvaguardia dettate dal T.U. sull'Ambiente.

Occorre però segnalare in diversi punti del parco la presenza di ristagni d'acqua talvolta del volume di decine di metri cubi, detti ristagni sono con tutta probabilità dovuti alla scarsa permeabilità del terreno per presenza d'argilla dovuta all'alterazione delle rocce vulcaniche.

La loro presenza è stata segnalata spesso in prossimità delle turbine e talvolta (nel caso della AG07) in corrispondenza delle piazzole stesse.

8. Indagini geognostiche

La necessità di integrare le informazioni di tipo geologico e geotecnico derivanti da studi pregressi, dalla letteratura di settore e dai rilievi geologici e geostrutturali in sito, ha reso necessario predisporre un piano di indagini geognostiche propedeutiche alla definizione del modello geologico di riferimento di sito funzionale alle opere previste in progetto così come richiamato dalle Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC2018 - §Cap. 6.2.1).

L'obiettivo delle indagini realizzate è stato:

1. Definire la stratigrafia ed i rapporti tra le formazioni geologiche interessate dagli interventi;
2. Definire le caratteristiche fisico-meccaniche degli ammassi rocciosi coinvolti nelle opere in progetto;
3. Individuare la presenza di circolazione d'acqua sotterranea alle profondità di interesse in relazione ai volumi significativi delle opere (fondazioni, piazzole, trincee e rilevati stradali, stabilità dei pendii)

La metodica utilizzata è quella indiretta in sito, ovvero l'indagine geofisica, questa costituisce parte integrante delle indagini geognostiche dirette e indirette legate alla caratterizzazione dei terreni di fondazione. In particolare si pone come obiettivo la ricostruzione dell'assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione nonché la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".

Sono stati eseguiti di n°3 **stendimenti di geoelettrica** (08 e 14 Giugno 2022), **3 stendimenti di sismica** con tecnica **MASW e rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni, così come i 3 stendimenti geoelettrici, i quali hanno il medesimo centro degli allineamenti sismici ma sono leggermente più lunghi (93,0 m).

E' stato inoltre eseguito il Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica. Sono stati infine elaborati i dati ottenuti tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

Stendimento	Metodo di indagine	Orientamento	Lunghezza (m)
SMT01- AG02	MASW	W-E	69,0
SMT01- AG02	Sismica a rifrazione in onde P	W-E	69,0
SMT01- AG02	Geoelettrica	W-E	93,0
SMT02- AG06	MASW	SW-NE	69,0
SMT02- AG06	Sismica a rifrazione in onde P	SW-NE	69,0
SMT02- AG06	Geoelettrica	SW-NE	93,0
SMT03- AG05	MASW	NW-SE	69,0
SMT03- AG05	Sismica a rifrazione in onde P	NW-SE	69,0
SMT03- AG05	Geoelettrica	NW-SE	93,0

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

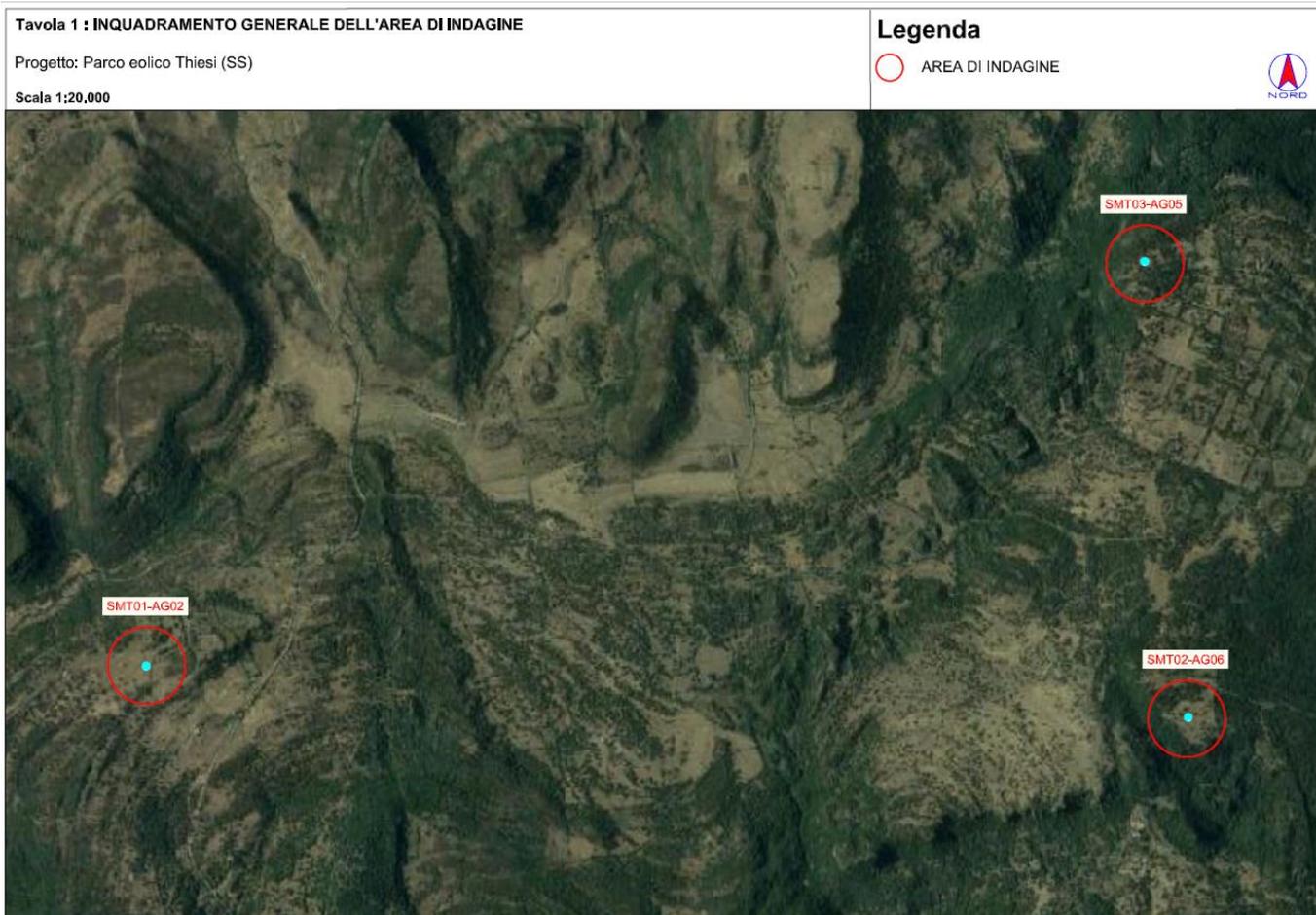


Figura 11 Ubicazione degli stendimenti

15.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione studia la velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo quando il terreno è sottoposto a sollecitazioni artificiali. La determinazione delle velocità si ottiene misurando i tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in diversi punti sulla superficie topografica. Operativamente i profili sismici si eseguono disponendo sul terreno una serie di sensori (geofoni), posti ad un intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare.

Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive in corrispondenza di punti prestabiliti lungo i profili: Nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con campionamento ad intervallo costante e predeterminato, dei segnali ricevuti dai sensori. L'interpretazione dei segnali e la ricostruzione del profilo di velocità delle onde P consiste di almeno due fasi ben distinte, e cioè l'interpretazione dei sismogrammi e l'interpretazione dei diagrammi tempi-istanze (dromocrone).

Nella prima fase i tempi di primo arrivo dei segnali sismici vengono letti direttamente sui sismogrammi di campagna visualizzati a monitor. I tempi letti in corrispondenza di ciascun canale (geofono), vengono memorizzati in appositi files che costituiscono i dati in input del software utilizzato. Per ciascun tiro, quindi, si ricostruisce un diagramma dei tempi di arrivo in funzione della distanza dal punto di tiro stesso.

L'interpretazione delle dromocrone consiste, quindi, nel suddividere la funzione tempi/distanze in segmenti a pendenza differente, indicativi della presenza di variazioni di velocità nel sottosuolo. Questa operazione viene

eseguita ad un terminale videografico dove è possibile eseguire modifiche ed aggiustamenti continui dell'interpretazione.

Il numero di segmenti per ciascuna funzione equivale al numero di strati che costituiranno il modello interpretativo finale; modello che consiste in una stratigrafia del terreno basata sulle variazioni di velocità delle onde compressionali.

Nella maggior parte dei casi, comunque, si riscontrano variazioni stratigrafiche che non corrispondono a variazioni di tipo litologico in senso stretto, ma alla naturale variazione di compattezza dello stesso materiale che, per alterazione superficiale o per semplice decompressione, si presenta più allentato in prossimità della superficie rispetto alle zone più profonde.

In questi casi per la modellizzazione del sottosuolo, risulta più adatta un'altra tecnica di elaborazione: la tecnica di elaborazione tomografica.

Con questa tecnica il sottosuolo viene suddiviso in elementi finiti di forma quadrata e di dimensioni estremamente piccole (dell'ordine di grandezza di decimetri) un software specifico, (nel nostro caso si è utilizzato il software RAYFRACT vers 4.01), che stima le velocità sismiche compatibili con ogni singolo elemento affinché i tempi di percorso dei vari fronti d'onda, generati nei punti di tiro disposti lungo il profilo, risultino il più possibile simili ai tempi misurati e letti sui sismogrammi. Il risultato che si ottiene è una griglia di valori di velocità dalla superficie fino alle massime profondità di indagine che caratterizzano i vari elementi in cui è stato suddiviso il sottosuolo.

Questa griglia di valori può essere, quindi utilizzata per rappresentare l'andamento nel sottosuolo delle varie litologie presenti mediante variazioni cromatiche associate alle variazioni di velocità o mediante linee di isovelocità.

15.1.2. Caratteristiche delle stese sismiche

Per tutte le basi sismiche sono state eseguite 9 energizzazioni intervallate ogni 3 geofoni secondo lo schema di acquisizione definito dalla specifiche tecniche.

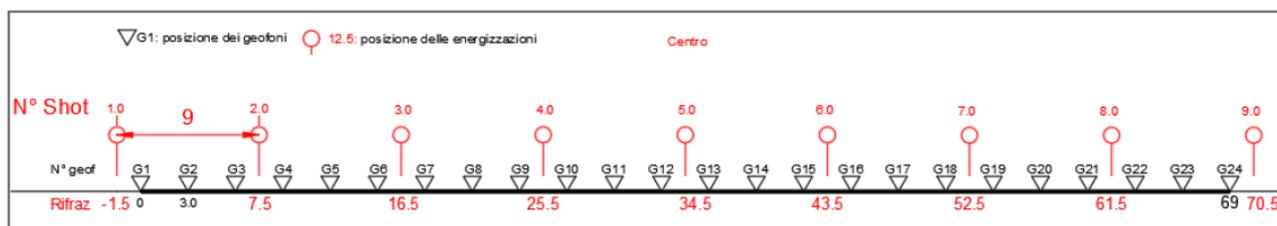


Figura 12 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

15.1.3. Caratteristiche della Strumentazione impiegata

Per l'esecuzione delle indagini è stato impiegato un sismografo GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 5.000 Hz (Rifrazione) e 1500 Hz (MASW) per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysical con frequenza propria di 4,5 Hz per un numero di canali pari a n° 24. Per l'energizzazione è stata impiegata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg. La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite una livella digitale e GPS differenziale marca Stonex in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

15.1.4. Elaborazione dei dati

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 27 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi). La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono. Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati

15.2. Indagini sismiche: MASW

Metodologia

La geofisica osserva il comportamento delle onde che si propagano all'interno dei materiali. Un segnale sismico, infatti, si modifica in funzione delle caratteristiche del mezzo che attraversa. Le onde possono essere generate in modo artificiale attraverso l'uso di masse battenti, di scoppi, etc.

Moto del segnale sismico

Il segnale sismico può essere scomposto in più fasi ognuna delle quali identifica il movimento delle particelle investite dalle onde sismiche. Le fasi possono essere:

- P-Longitudinale: onda profonda di compressione;
- S-Trasversale: onda profonda di taglio;
- L-Love: onda di superficie, composta da onde P e S;
- R-Rayleigh: onda di superficie composta da un movimento ellittico e retrogrado.

Onde di Rayleigh – "R"

In passato gli studi sulla diffusione delle onde sismiche si sono concentrati sulla propagazione delle onde profonde (P,S) considerando le onde di superficie come un disturbo del segnale sismico da analizzare. Recenti studi hanno consentito di creare dei modelli matematici avanzati per l'analisi delle onde di superficie in mezzi a differente rigidità.

Analisi del segnale con tecnica MASW

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

Modellizzazione

È possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times \nu$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.

Modi di vibrazione

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

Profondità di indagine

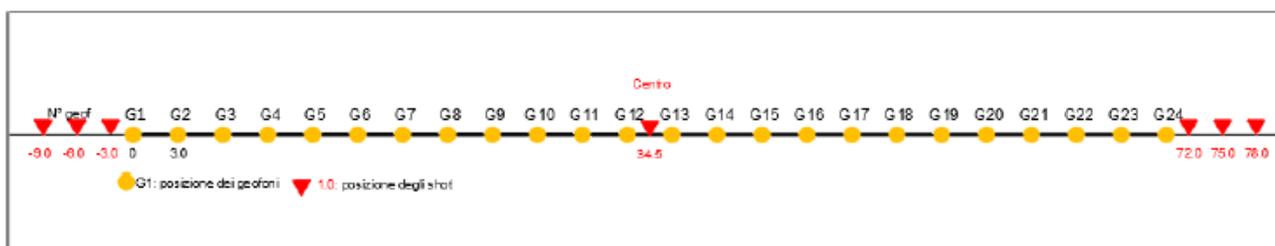
Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

15.2.1. Specifiche delle indagini svolte

L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a **3,0 m** in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in "andata" e in "ritorno" con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema), oltre che una battuta al centro della base sismica.

Il numero di geofoni utile all'esecuzione ottimale di un'indagine M.A.S.W. è risultato, per il cantiere svolto, di 24 geofoni dei quali sono state utilizzate tutte le tracce. Il tempo dell'acquisizione è stato definito tra 1.00 e 2.00 secondi.

MASW: schema geometrico delle acquisizioni a 24 geofoni e interdistanza di 3,0 m



15.2.2. Caratteristiche della strumentazione impiegata

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysical con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali.

Per l'energizzazione ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 29 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

15.2.3. Interpretazione dei segnali acquisiti

Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

1. individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
2. analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
3. stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

A posteriori dell'analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all'inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

L'elaborazione dei dati che ha prodotto il profilo di velocità è stata realizzata grazie all'impiego del software ZondST2D.

15.2.4. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato H è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II. Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018.

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

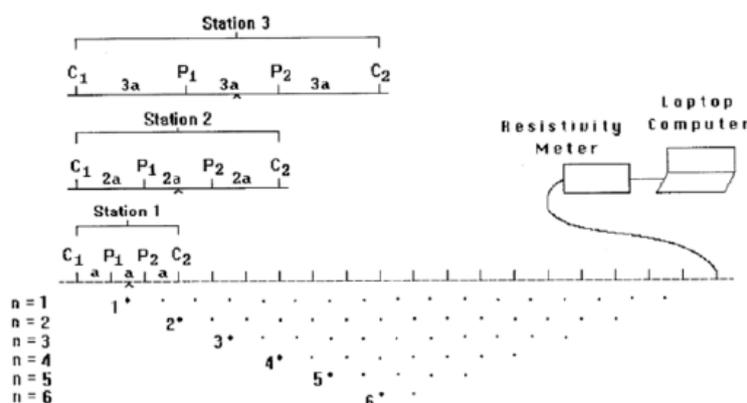
Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

15.3. Tomografia elettrica

15.3.1. Tecnica e parametri utilizzati

Lo scopo dei metodi geofisici è quello di ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo attraverso una serie di misure opportunamente effettuate in superficie. Il metodo utilizzato in questa indagine ricade fra i metodi geoelettrici "attivi", cioè quelli che utilizzano correnti elettriche artificialmente immesse nel terreno, con l'intento di misurare la resistività apparente degli strati attraversati dalla corrente elettrica. La tecnica tomografica si compone di uno stendimento costituito nel caso specifico da un massimo di 32 elettrodi posti ad un'interdistanza costante l'uno dall'altro, che vengono gestiti automaticamente dallo strumento di misura e commutati alternativamente come elettrodi di corrente e di misura di differenza di potenziale (d.d.p.). La metodologia permette l'acquisizione di una considerevole quantità di dati sulla resistività "apparente", rappresentativi sia delle variazioni laterali, che verticali lungo il profilo così da generare una Tomografia Elettrica lungo una linea sul terreno.



L'utilizzo appropriato dei programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico. La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante, poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di scarica, tracce di dispersione d'inquinanti, etc.

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 31 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

La **profondità d'esplorazione** è variabile secondo il dispositivo e della risoluzione richiesta; mediamente è pari a circa 1/5 della lunghezza dello stendimento.

15.3.2. Geometria delle acquisizioni

Per ciascun stendimento sono state impiegate tre geometrie di acquisizione, come di seguito specificato:

- Quadripolo di Wenner
- Quadripolo di Wenner Schlumberger
- Quadripolo Dipolo-Dipolo

Ogni metodo utilizzato ha delle caratteristiche proprie e come tale tende meglio a rappresentare specifiche strutture presenti nel sottosuolo. In particolare:

1. Il quadripolo di Wenner (di seguito W) presenta caratteristiche per il quale risulta maggiormente idoneo nell'investigazione di strutture orizzontali (quali quelle sedimentarie o laviche).
2. Il quadripolo di Wenner-Schlumberger (di seguito WS) risulta essere un buon compromesso per l'investigazione sia di strutture orizzontali che verticali (faglie, dicchi, cavità),
3. Il quadripolo Dipolo-Dipolo (di seguito DD) è prevalentemente idoneo nell'investigazione di strutture verticale (faglie, dicchi, cavità), mentre risulta essere poco adatto in presenza di strutture orizzontali, quali quelle sedimentarie.

Il W e il WS si distinguono anche per un minore "rumore" delle acquisizioni, ossia una miglior rapporto tra segnale acquisito e disturbo della misura, nonché per una maggiore capacità di investigazione in profondità.

15.3.4. Strumentazione e attrezzatura utilizzata

La strumentazione utilizzata per lo studio è composta dai seguenti dispositivi:

- sistema di misurazione ed acquisizione formato da un georesistivimetro completo di unità di energizzazione ed un computer per la gestione automatica delle acquisizioni (apparecchiatura per tomografia elettrica Mod. Polares della PASI) che fornisce la corrente da immettere nel sottosuolo con una tensione in uscita di picco di $\pm 700V$ ed una corrente variabile fra 5 e 2.000 mA.;
- n° 2MUX per la gestione automatica delle acquisizioni in cui gli elettrodi collegati all'unità di acquisizione ed energizzazione sono in grado di funzionare alternativamente come elettrodi di corrente e di potenziale;
- N° 2 cavi per 16 elettrodi *cabla A-B-M-N* con connettore per MUX
- 32 elettrodi in acciaio inox

15.3.5. Elaborazione dei dati e software

L'elaborazione tomografica consiste, nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle secondo uno schema definito con riferimento alla distribuzione e alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle è calcolata la resistività apparente che soddisfa il complesso delle misure eseguite, su questo schema è applicato il metodo d'ottimizzazione dei minimi quadrati modificando il modello di partenza, in maniera iterativa in modo che si riduca la differenza tra i valori di resistività apparente calcolati e quelli effettivamente misurati.

Il **grafico** che ne deriva è una sezione bidimensionale in cui le zone ad uguale resistività sono raffigurate da aree caratterizzate dal medesimo colore. Le tinte blu rappresentano resistività basse, poi si passa a colori che vanno dal verde al giallo e infine al rosso che rappresenta litologie a resistività via via sempre più alte. Le misure sperimentali sono state elaborate mediante uno specifico programma di interpretazione tomografica denominato "ZONDRES2D". Il programma d'interpretazione tomografica ZONDRES2D elabora un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo che soddisfa i valori sperimentali acquisiti con le varie interdistanze dello stendimento.

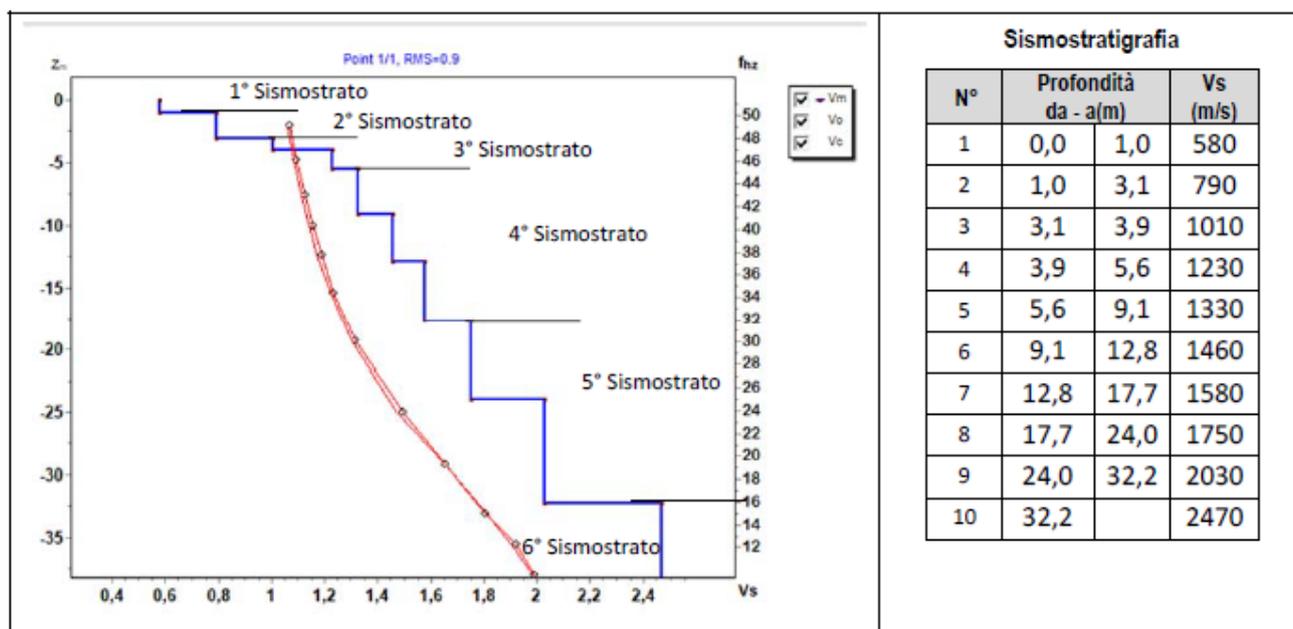
15.4. Risultati delle indagini del sito SMT01 (AG02)

15.4.1. Masw SMT01

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT01, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 1,0	1° sismostrato con Vs di 580 m/s , Terre di copertura molto addensate
1,0 – 3,1	2° sismostrato con Vs di 790 m/s , Roccia fratturata
3,1 – 5,6	3° sismostrato con Vs tra 1010 e 1230 m/s , Substrato roccioso da fratturato a debolmente fratturato
5,6 – 17,7	4° sismostrato con Vs tra 1330 e 1580 m/s , Substrato roccioso sano
17,7 – 32,2	5° sismostrato con Vs tra 1750 e 2030 m/s , Substrato roccioso sano
>32,2	6° sismostrato con Vs di 2470 m/s , Substrato roccioso sano

MASW SMT01 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **3,1 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **3,1 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 3,1 / 0,004372 = 709$ m/s.

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B** Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Chiaramente in caso di realizzazione di fondazioni a profondità maggiore di 0,2 m da p.c. la classificazione del sottosuolo passa ad una **categoria A**

Nella **tabella seguente** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G ₀	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-1,0	terre	1.700	1.160	580	0,33	1.530	184	569	1.530
2	1,0-3,1	10%	1.900	1.580	790	0,33	3.158	316	1.187	3.158
3	3,1-5,6	15%	2.000	2.240	1.120	0,33	6.688	1.003	2.511	6.688
4	5,6-17,7	20%	2.200	2.910	1.455	0,33	12.415	2.483	4.658	12.415
5	17,7-32,2	25%	2.300	3.780	1.890	0,33	21.908	5.477	8.218	21.908
6	>32,2	30%	2.400	4.940	2.470	0,33	39.051	11.715	14.642	39.051

Figura 13 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

15.4.2. Rifrazione SMT01 e Tomografia elettrica SMT01

Nella sezione di sismica a rifrazione **STM01** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento SMT01	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (rippabili)	Da 0,0 a 1,0/1,5	400-800
B: Unità delle rocce fratturate (rippabili)	Da 1,0/1,5 a 3,0/4,0	800-1600
C: Unità delle rocce da fratturate a debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,0 a 5,0/8,0	1600-2200
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 5,0/8,0 a 26,0	2200-4500

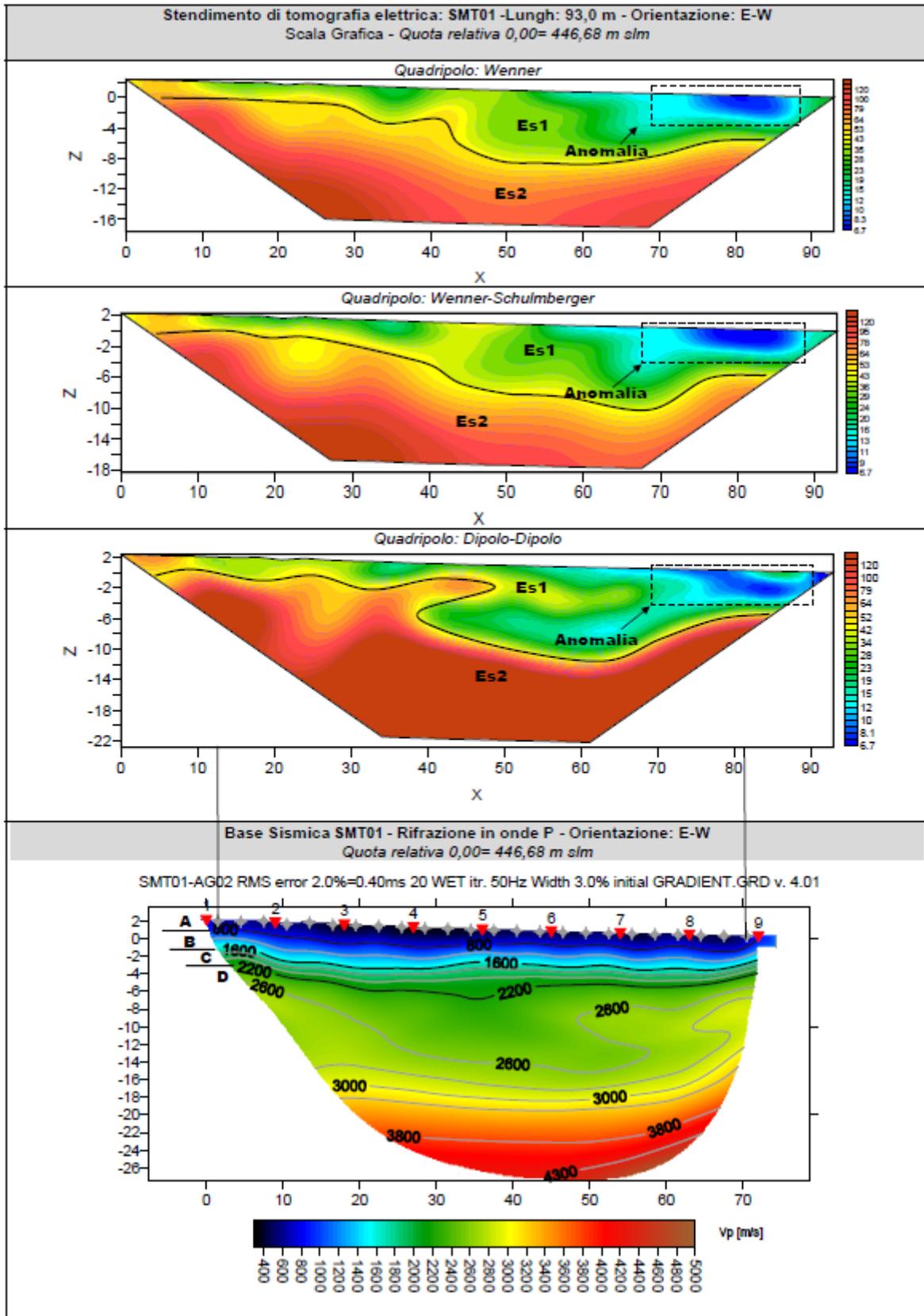
Dall'esame della sezione sismica si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (tra 1,0 e 1,5 metri da p.c) e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce fratturate ancora rippabili presenta anch'esso un compreso tra 3,0 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C (limite dei materiali rippabili) si osserva invece fino alla profondità di circa 5,0/8,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo meno fratturato del precedente e quindi rippabile con difficoltà. Il sismostrato D (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità massima di indagine (26,0 m

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 34 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

dal p.c) ed è composto da materiali lapidei compatti non rippabili, i quali sono caratterizzati da velocità alte. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle V_p con alcune variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso. In particolare si osserva che nella parte centrale della sezione si ha un settore caratterizzato da velocità inferiori fino alla profondità di 12,0 m. dal p.c, dovute probabilmente alla presenza di materiali rocciosi maggiormente alterati/fratturati.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a 5,0 e 8,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

Le sezioni di tomografia elettrica **SMT01**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, sono caratterizzate nel complesso da leggere variazioni di resistività da cui si può distinguere la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore compreso tra 4,0 e 8,0 metri riconducibile alla coltre di terreni/rocce alterate/fratturate caratterizzati da valori di resistività bassi, tra 6 e 50 $\Omega \cdot m$, ben distinguibile con le tutte e 3 le acquisizioni. In tale sismostrato, in corrispondenza della parte destra delle sezioni, si osservano delle anomalie caratterizzate dai valori più bassi di resistività, riconducibile alla probabile presenza di materiale maggiormente alterato (v. argillificazione). Segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori medio bassi di resistività (tra 50 e 140 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza del substrato litoide più compatto. Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione, mette in evidenza che in entrambe le acquisizioni si riconosce un settore nella parte centrale della sezione caratterizzata da materiali rocciosi con caratteristiche fisico meccaniche più scadenti rispetto alle zone più esterne dovuta probabilmente alla presenza di materiali alterati/fratturati, mentre solo nelle acquisizioni di tomografia elettrica si riconosce una zona tra le progressive 70,0 m e 85,0 m caratterizzata dai valori più bassi di resistività, riconducibile alla probabile presenza di materiale maggiormente alterato (v. argillificazione).



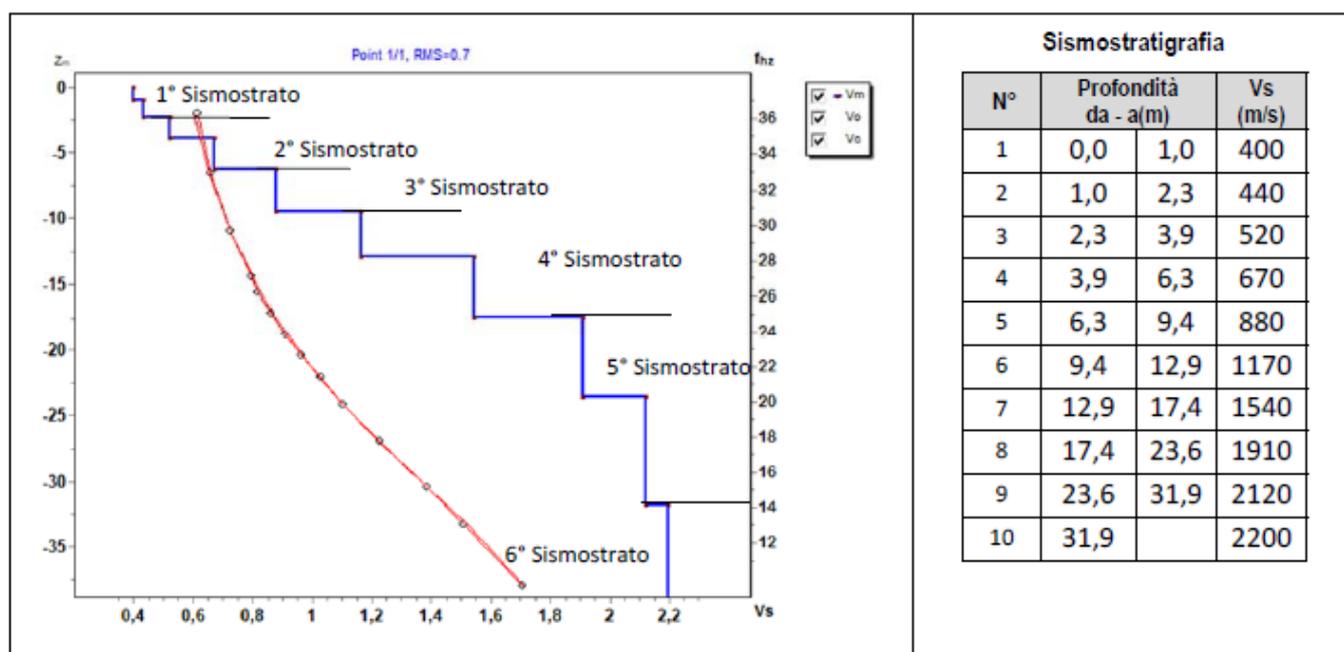
15.5. Risultati delle indagini del sito SMT02

15.5.1. Masw SMT02

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT02, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 2,3	1° sismostrato con Vs tra 400 e 440 m/s , Terre mediamente addensate
2,3 – 6,3	2° sismostrato con Vs tra 520 e 670 m/s , Rocce fratturate
6,3 – 9,4	3° sismostrato con Vs di 880 m/s , Substrato roccioso fratturato
9,4 – 17,4	4° sismostrato con Vs tra 1170 e 1540 m/s , Substrato roccioso da fratturato a sano
17,4 – 31,9	5° sismostrato con Vs tra 1910 e 2120 m/s , Substrato roccioso sano
>31,9	6° sismostrato con Vs di 2200 m/s , Substrato roccioso sano

MASW SMT02 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

con:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **6,3 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,3 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 6,3 / 0,012101 = 520$ m/s.

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Nella **tabella seguente** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,3	terre	1.600	840	420	0,33	755	91	284	755
2	2,3-6,3	10%	1.800	1.190	595	0,33	1.697	170	637	1.697
3	6,3-9,4	15%	2.000	1.760	880	0,33	4.129	619	1.549	4.129
4	9,4-17,4	20%	2.200	2.710	1.355	0,33	10.768	2.154	4.040	10.768
5	17,4-31,9	25%	2.300	4.030	2.015	0,33	24.899	6.225	9.336	24.899
6	>31,9	30%	2.400	4.400	2.200	0,33	30.980	9.294	11.621	30.980

Figura 14 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

15.5.2. SMT02: Rifrazione e Tomografia elettrica

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT02** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento SMT02	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-800
B: Unità delle rocce fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 2,0/6,0	800-1600
C: Unità delle rocce da fratturate a debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 2,0/6,0 a 4,0/9,5	1600-2200
D: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili)	Da 4,0/9,5 a 16,0/20,0	2200-4000

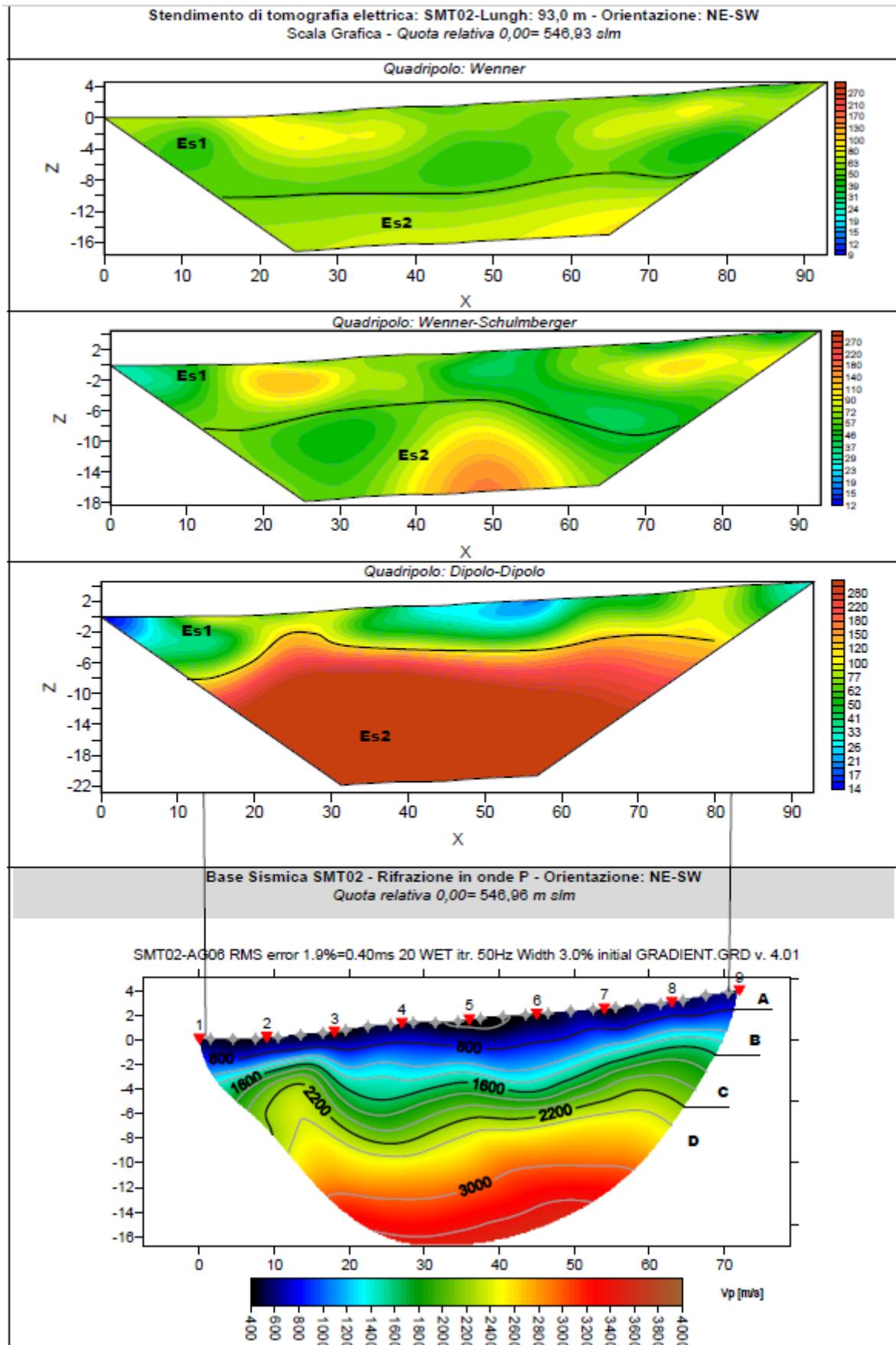
Dall'esame della sezione sismica si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4000 m/s. Il sismostrato A presenta spessori ridotti (tra 1,0 e 2,0 metri dal p.c) e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce fratturate ancora rippabili presenta un andamento parallelo al piano campagna per gran parte della sezione ad esclusione del tratto iniziale in cui presenta spessori nettamente inferiori, infatti in tale area si rileva già alla profondità di 2,0 m, mentre nel resto della sezione si riscontra a profondità comprese tra 4,0 e 6,0 metri di profondità dal p.c. Il sismostrato C (limite dei materiali rippabili) caratterizzato da rocce con grado di

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 38 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

fratturazione inferiore rispetto al precedente, segue l' andamento del sismostrato B e si osserva fino a profondità comprese tra 4,0/9,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo con un grado di fratturazione inferiore del precedente sismostrato e quindi rippabile con difficoltà. Il sismostrato D (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità massima di indagine compresa tra 16,0 e 20,0 m dal p.c ed è composto da materiali lapidei compatti non rippabili caratterizzati da velocità alte. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con alcune variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,0 e 6,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 4,0 e 9,5 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Si precisa che le profondità minori a cui si osservano i materiali rippabili con difficoltà e non rippabili si trovano esclusivamente nelle zone più esterne della sezione, in particolare nella parte iniziale. Le sezioni di tomografia elettrica **SMT02**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, sono caratterizzate nel complesso da leggere variazioni di resistività da cui si può distinguere la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore compreso tra 4,0 e 10,0 metri riconducibile alla coltre di terre e rocce alterate/fratturate caratterizzato da valori di resistività medio bassi, compresi tra 9 e 100 $\Omega \cdot m$, ben distinguibile con le tutte e 3 le acquisizioni. In tale elettrostrato si osservano tra le progressive 20,0-30,0 metri e 70,0-80,0 metri delle zone caratterizzate dalla presenza di roccia con caratteristiche fisico meccaniche migliori rispetto alla zona centrale, la quale presenta sicuramente una maggiore quantità di materiale terrigeno e/o roccia maggiormente alterata e fratturata. A partire da profondità comprese tra 4,0 e 10,0 m dal piano campagna segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori più alti di resistività (tra 100 e 300 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza di uno strato litoide più compatto. La geometria di acquisizione Dipolo-Dipolo risulta quella che, nel contesto litologico in esame, porta ad una ricostruzione geologico-stratigrafica più attendibile e simile ai risultati ottenuti con la sismica a rifrazione.

Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione conferma che a partire dal piano campagna si riscontra la presenza di materiale terrigeno e rocce fratturate fino a profondità comprese tra 4,0 e 10,0 metri dal piano campagna, in particolare si osserva che nelle zone esterne della sezione si ha una prevalenza di materiali rocciosi con caratteristiche fisico meccaniche migliori rispetto alla zona centrale, la quale è caratterizzata da una maggiore quantità di materiale terrigeno e/o roccia maggiormente alterata e/o fratturata. Dalle profondità comprese tra 4,0 e 10,0 metri dal piano campagna si incontra invece uno strato litoide più compatto caratterizzato da velocità medio alte delle Vp e valori di resistività maggiori rispetto ai materiali sovrastanti.



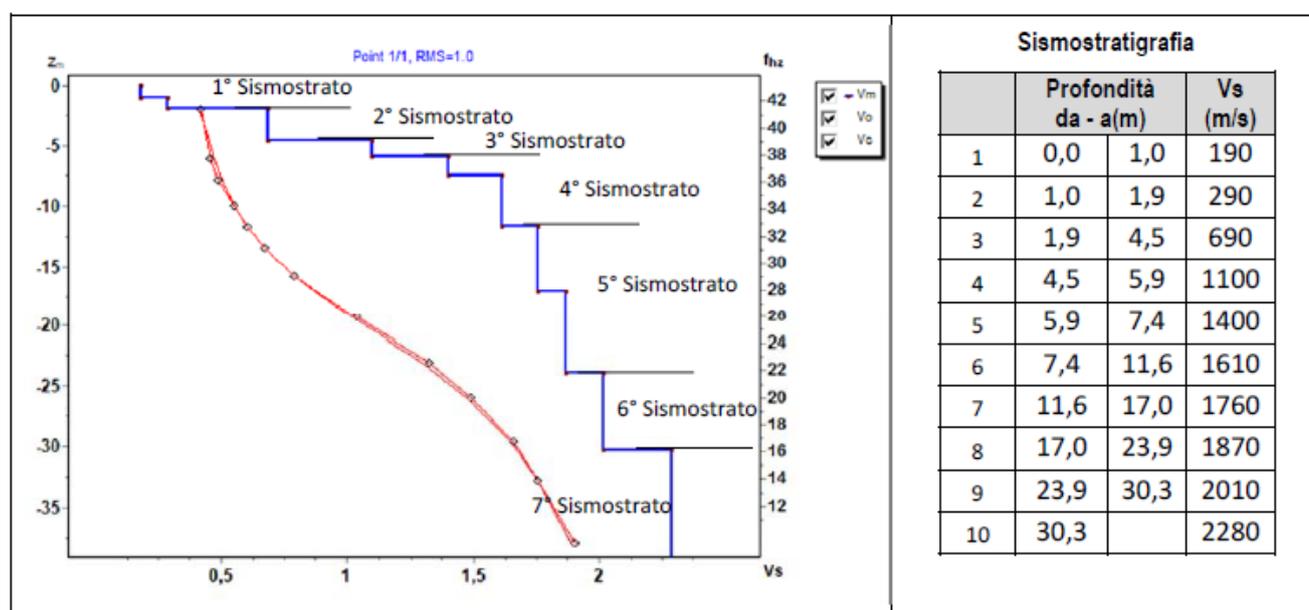
15.6. Risultati delle indagini del sito SMT03

15.6.1. Masw SMT03

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali V_s dello stendimento SMT03, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio V_s .

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 – 1,9	1° sismostrato con V_s tra 190 e 290 m/s, Terre debolmente addensate
1,9 – 4,5	2° sismostrato con V_s di 690 m/s, Roccia fratturata
4,5 – 5,9	3° sismostrato con V_s di 1100 m/s, Substrato roccioso fratturato
5,9 – 11,6	4° sismostrato con V_s tra 1400 e 1610 m/s, Substrato roccioso da fratturato a sano
11,6 – 23,9	5° sismostrato con V_s tra 1760 e 1870 m/s, Substrato roccioso sano
23,9 – 30,3	6° sismostrato con V_s di 2010 m/s, Substrato roccioso sano
>30,3	7° sismostrato con V_s > di 2280 m/s, Substrato roccioso sano

MASW SMT03 - PROFILO V_s



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle V_s si pone come profondità del substrato **4,5 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **4,5 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 4,5/0,012294 = 366$ m/s.

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Nella **tabella seguente** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G ₀	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	1	0-1,9	terre	1.600	480	240	245	29	88	245
2	2	1,9-4,5	10%	1.900	1.380	690	2.412	241	902	2.412
3	3	4,5-5,9	15%	2.100	2.200	1.100	6.777	1.016	2.540	6.777
4	4	5,9-11,6	20%	2.200	3.010	1.505	13.288	2.658	4.982	13.288
5	5	11,6-23,9	25%	2.300	3.630	1.815	20.202	5.051	7.581	20.202
6	6	23,9-30,3	30%	2.400	4.020	2.010	25.861	7.758	9.699	25.861
7	7	>30,3	30%	2.400	4.560	2.280	33.274	9.982	12.474	33.274

Figura 15 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia

di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

15.6.2. Rifrazione SMT03

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT03** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento SMT03 Sismostrati	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-800
B: Unità delle rocce fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 4,0/6,0	800-1600
C: Unità delle rocce da fratturate a debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 4,0/6,0 a 6,0/10,0	1600-2200
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 6,0/10,0 a 20,0/21,0	2200-4500

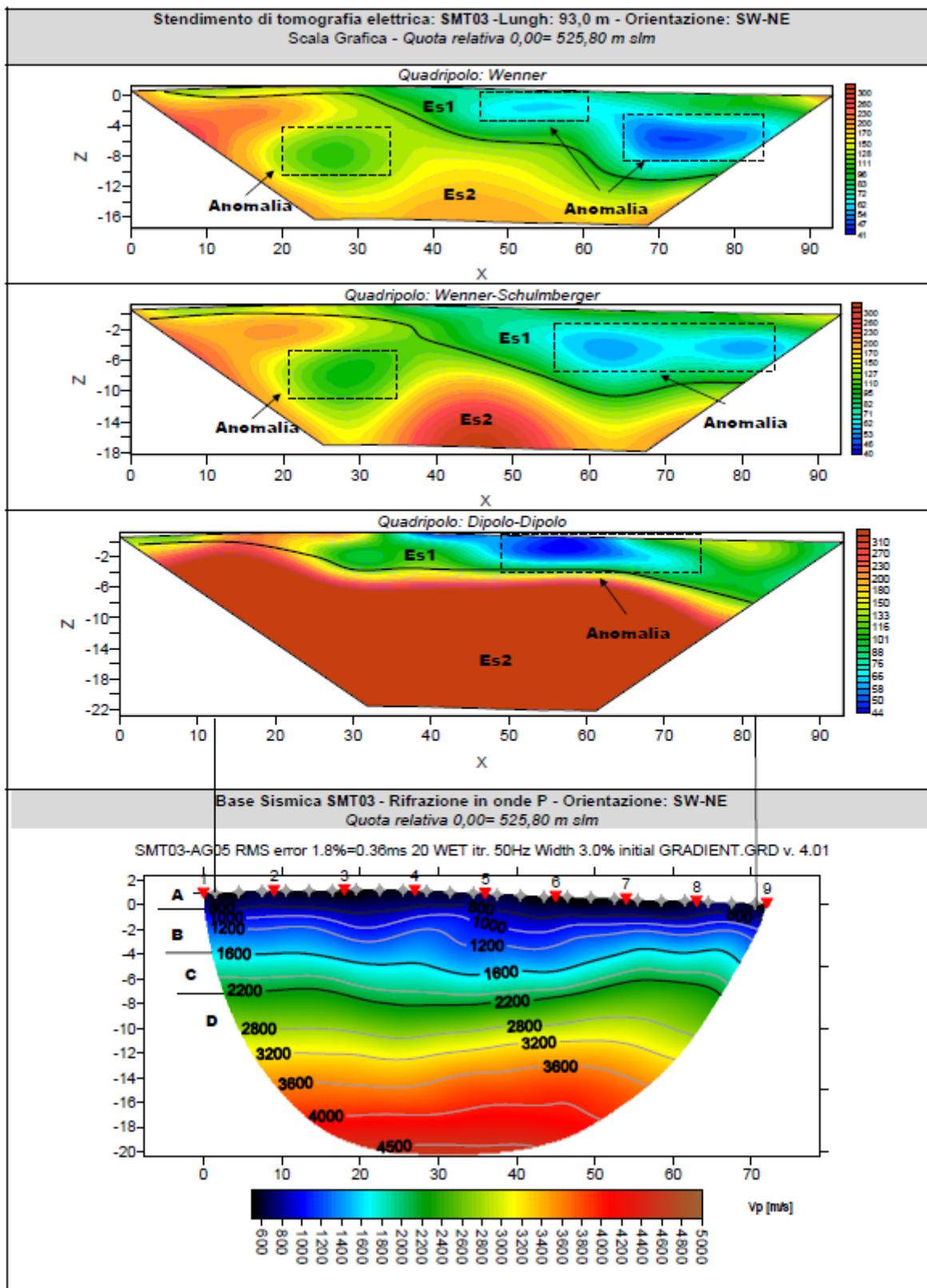
Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (tra 1,0 e 2,0 metri dal p.c) e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce fratturate ancora rippabili, presenta anch'esso un andamento parallelo al piano campagna e leggerissime variazioni di spessore, si rileva fino a profondità comprese tra 4,0 e 6,0 m dal p.c. Il

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 42 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

sismostrato C (limite dei materiali rippabili) segue anch'esso lo stesso andamento dei due precedenti sismostrati con leggere variazioni di spessore, si rileva fino alla profondità di 6,0 e 10,0 m dal piano campagna. Il sismostrato D (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità di circa 20,0/21,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte (2200-4500 m/s). Dall'osservazione della sezione sismica si osserva un aumento graduale delle Vp con alcune leggerissime variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4,0 e 6,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 6,0 e 10,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Le sezioni di tomografia elettrica **SMT03**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, sono caratterizzate nel complesso da leggere variazioni di resistività da cui si può distinguere la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore compreso tra 1,0 e 10,0 metri riconducibile alla coltre di terreni e rocce alterate/fratturate caratterizzati da resistività medio bassa, con valori tra 40 e 100 $\Omega \cdot m$, ben distinguibile con le tutte e 3 le acquisizioni. In tale elettrostrato si osservano alcune anomalie rappresentate dai valori resistività più bassi riconducibili alla presenza di acqua e/o all'argillificazione del materiale in posto. A partire da profondità comprese tra 1,0 e 10,0 m dal piano campagna segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori più alti di resistività (tra 100 e 300 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza del substrato litoide più compatto. In tale elettrostrato, nelle geometrie di acquisizione Wenner e Wenner-Schulmberger e in corrispondenza delle progressive 20,0 e 35,0 m, si osserva una anomalia caratterizzata da valori di resistività inferiori dovuta alla probabile presenza di materiale con un grado di alterazione (v.argillificazione) maggiore rispetto alle zone adiacenti.

Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione conferma che a partire dal piano campagna si riscontra la presenza di materiale terrigeno e rocce alterate/fratturate fino a profondità comprese tra 1,0 e 10,0 metri, per poi passare a materiali litoidi più sani e compatti caratterizzati da velocità alte delle Vp e valori di resistività maggiori.



La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico delle aree in esame e dedurre le caratteristiche sismiche.

Per quanto riguarda le MASW, lungo gli stendimenti si evince la presenza di sismostrati con velocità V_{seq} crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamenti e spessori indicati nei precedenti paragrafi. La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per i differenti siti di indagine, che si ricorda sarà anche funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	V_{seq} [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
SMT01-AG02	3,1	709	B
SMT02-AG06	6,3	520	B
SMT03-AG05	4,5	366	B

I dati derivati dalla MASW messi in correlazione con le bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio. L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione e di tomografia elettrica ha permesso di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 5,0 e 8,0 m dal p.c. per SMT01, tra 4,0 e 9,5 m dal p.c. per SMT02 e tra 6,0 e 10,0 m dal p.c. per SMT03, i terreni risultano non rippabili. L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da range abbastanza ridotti e valori di resistività generalmente medio bassi. Nelle varie sezioni si sono messe in evidenza delle anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione, che nel contesto in esame possono essere interpretate come dei settori caratterizzati dalla presenza di materiale maggiormente alterato (argillificazione)/fratturato rispetto alla roccia adiacente e/o alla presenza d'acqua. Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE SMT01-AEROGENERATORE AG02

Progetto: Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:500

Legenda

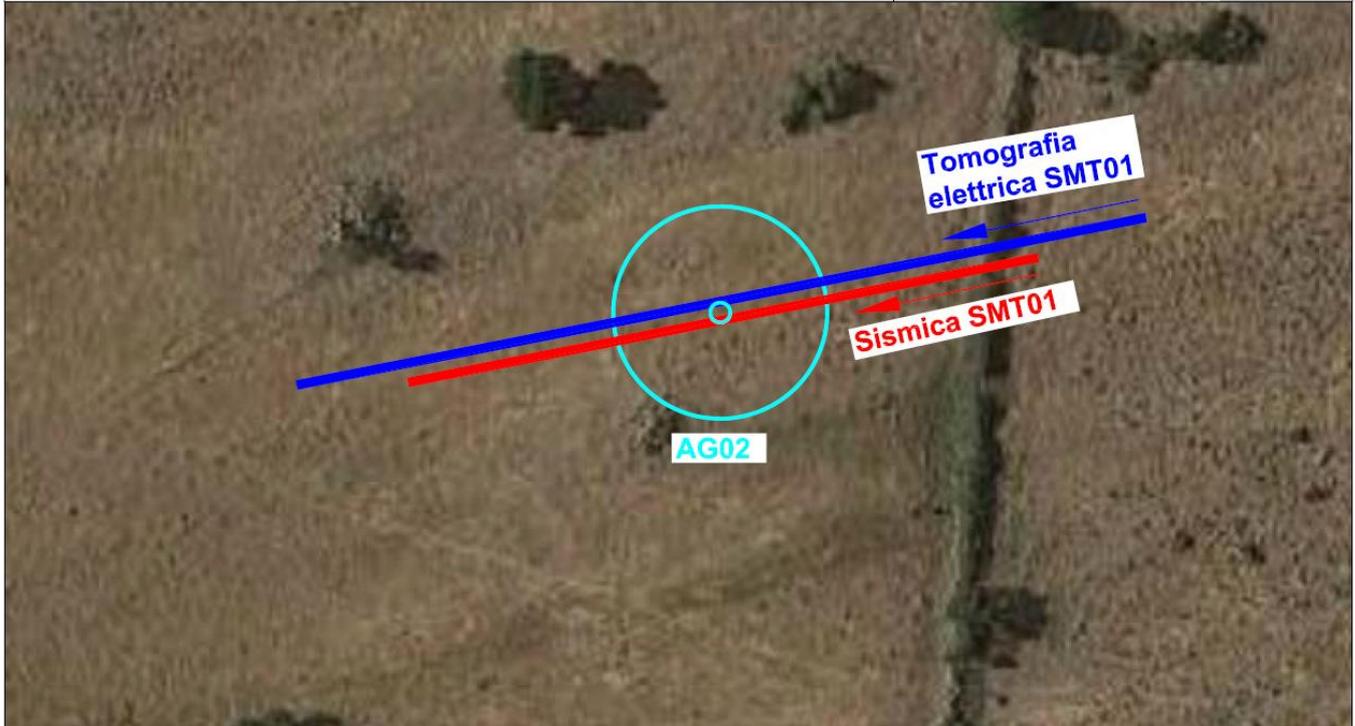
Stendimento Sismico SMT01 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT01 - Lunghezza = 93,0 m

— Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

— Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

○ Aerogeneratore



**Tavola 3 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI
GEOFISICHE SMT02-AEROGENERATORE AG06**

Progetto; Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:500

Legenda

Stendimento Sismico SMT02 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT02 - Lunghezza = 93,0 m

—> Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo
geofono—> Direzione stendimento geoelettrico dal primo
all'ultimo elettrodo

○ Aerogeneratore



Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE SMT03-AEROGENERATORE AG05

Progetto: Parco eolico Thiesi (SS)

Scala 1:500

Legenda

Stendimento Sismico SMT03 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT03 - Lunghezza = 93,0 m

—> Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

—> Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

○ Aerogeneratore

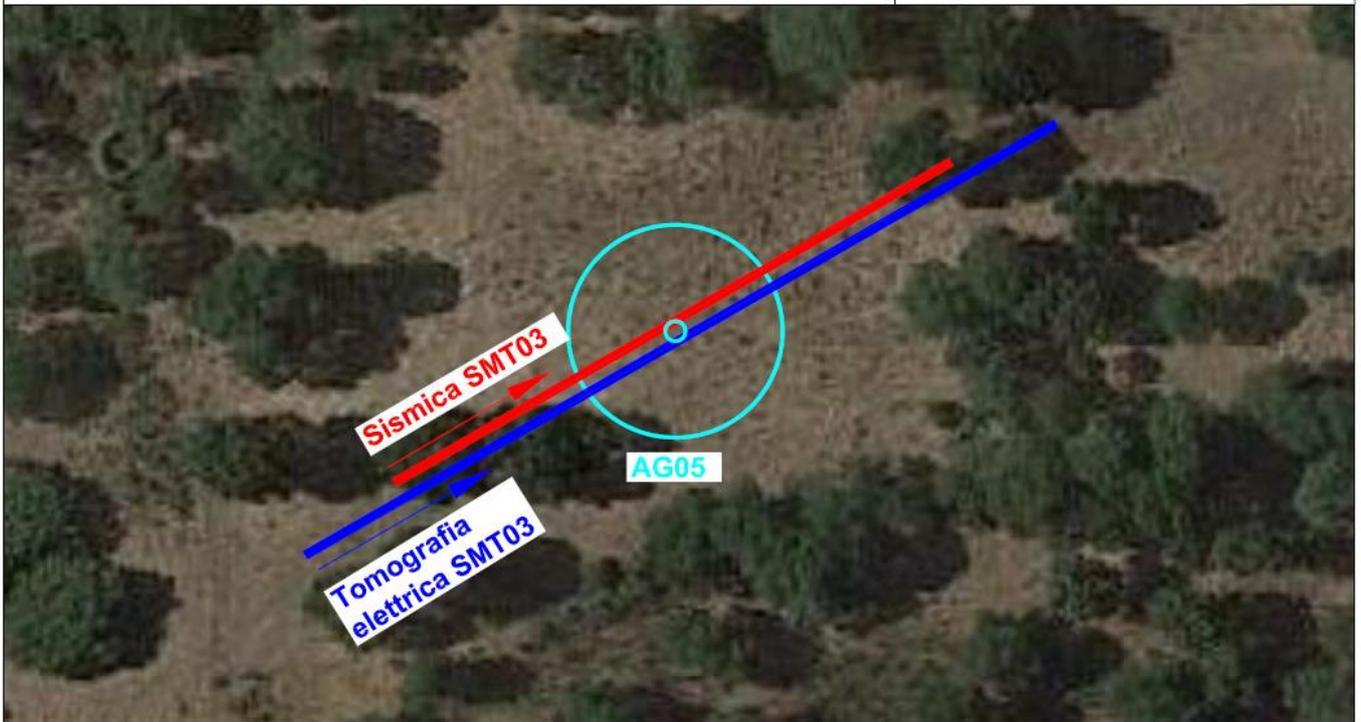


Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE SMT03-AEROGENERATORE AG06

Progetto: Parco eolico Ittiri (SS)

Scala 1:500

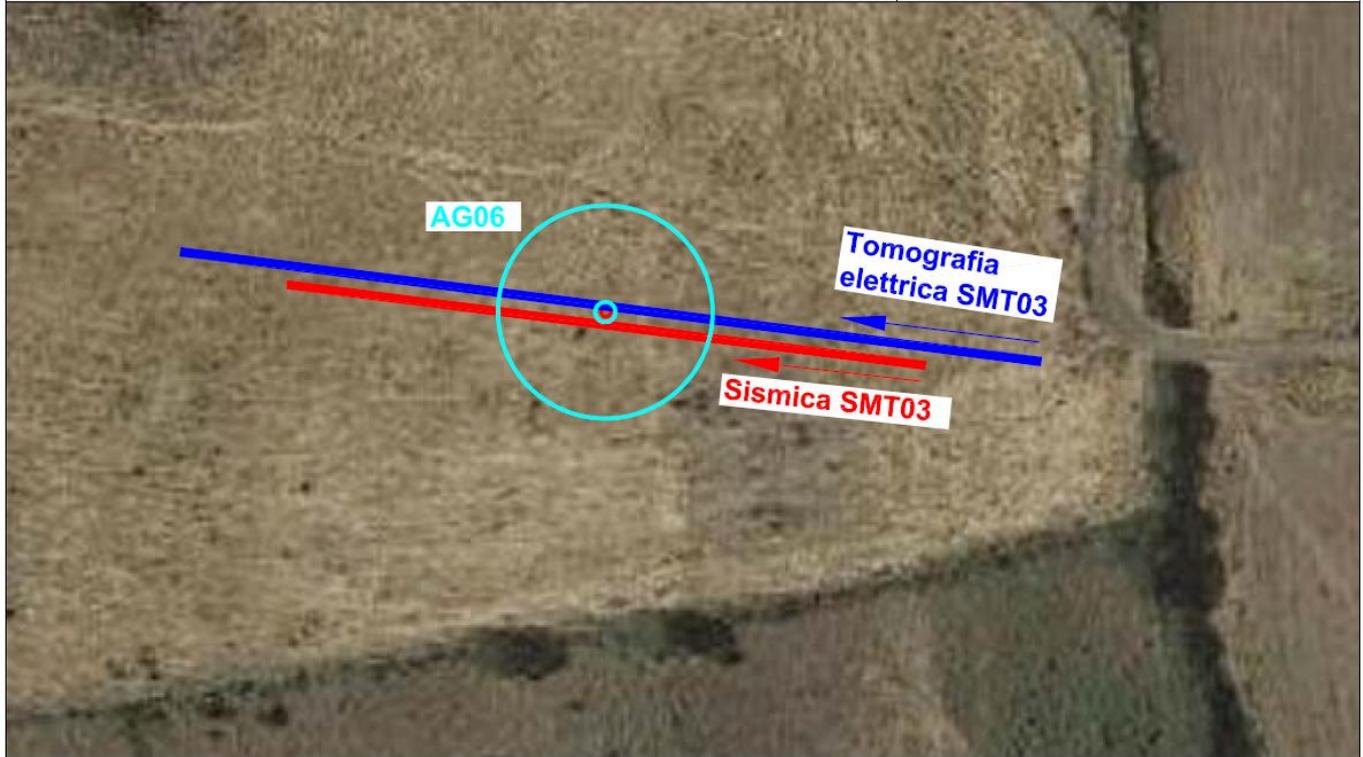
Legenda

Stendimento Sismico SMT03 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico SMT03 - Lunghezza = 93,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

→ Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo



BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 49 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

9. Modellazione geologica

16.1. Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi

Per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso al quale la fondazione delle turbine si appoggia, è stato adoperato il criterio di caratterizzazione dell'ammasso roccioso di Hoek-Brown generalizzato (1995), supportato dai dati geostrutturali rilevati in sito in pareti esposte, laddove disponibili, dai dati derivanti dai sondaggi geognostici.

Sulla base di tale classificazione, il cui criterio di rottura è definito dalla relazione seguente:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (mb (\sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s)^a$$

dove:

σ'_1 e σ'_3 = sforzi efficaci principali rispettivamente massimo e minimo a rottura;

mb = costante d'ammasso

s ed a = costanti d'ammasso

σ_{ci} = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta

è stato possibile risalire ai parametri di coesione e angolo di attrito interno secondo Mohr- Coulomb.

Tale metodologia si basa su caratteristiche proprie dell'ammasso, valutabili tramite osservazioni in sito o con l'ausilio di tabelle sviluppate sulla base di una vasta raccolta di dati pubblicati in letteratura, attraverso cui è possibile stimare con una certa precisione i parametri di coesione e angolo di attrito interno necessari alle verifiche di stabilità, valutando i seguenti parametri:

1. Resistenza a compressione monoassiale (Intact Uniaxial Compressive Strength – IUCS) stimata su base empirica (Fig.60) e su valori di Point Load.
2. Stima dell'indice GSI (Geological Strength Index) in base alle caratteristiche geologiche dell'ammasso: tale indice, introdotto da Hoek, Kaiser e Bawden (1995), può esser definito sulla base delle caratteristiche dell'ammasso (Fig. 61) o sulla base di un controllo diretto con l'indice RMR della classificazione di Bieniawski.
3. Determinazione della costante m_i (Funzione del tipo di roccia): i valori delle costanti caratteristiche della roccia (σ_{ci} e m_i) vengono generalmente definiti sulla base di apposite prove di laboratorio, ma in assenza delle suddette, è possibile fare riferimento alla tabella di Fig.62, che riassume i valori della costante m_i per diversi tipi di roccia.

CLASSE [*]	DESCRIZIONE	RESISTENZA A COMPRESIONE MONOASSIALE (MPa)	INDICE DI RESISTENZA (POINT LOAD) (MPa)	VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA IN SITO	ESEMPI
R6	Resistenza estremamente elevata	> 250	> 10	Un campione può essere scheggiato solamente con un martello geologico	Basalto intatto, silice, selce, diabase, gneiss granito, quarzite
R5	Resistenza molto elevata	100-250	4-10	Un campione richiede molti colpi di un martello geologico per essere fratturato	Anfibolite, arenaria basalto, gabbro, gneiss, granodiorite calcare, marna riolite, tufi
R4	Resistenza elevata	50-100	2-4	Un campione richiede più di un martello geologico per essere fratturato	Calcare, marna, fillite, arenaria, scisto, argillite
R3	Resistenza media	25-50	1-2	Non può essere raschiato o spellato con un coltellino, un campione può essere fratturato con un solo colpo mediante un martello geologico	Argillite, carbone, calcestruzzo, scisto, siltite
R2	Resistenza bassa	5-25	[**]	Con difficoltà può essere spellato con un coltellino, una intaccatura superficiale può essere procurata con un colpo inferto mediante la punta di un martello geologico	Calcare bianco, salgemma
R1	Resistenza molto bassa	1-5	[**]	Si frantuma per effetto di alcuni colpi con la punta di un martello geologico, può essere spellato mediante un coltellino	Rocce estremamente alterate o alterate
R0	Resistenza estremamente bassa	0.25-1	[**]	Intagliato con l'unghia di un pollice	Miloniti, cataclasi

[*] In accordo a Brown E.T. Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods, pp. 171-183. Oxford, Pergamon (1981).
 [**] La prova meccanica point load su rocce con resistenza a compressione monoassiale inferiore a 25 MPa fornisce risultati poco attendibili.

Figura 16 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

DESCRIZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	CONDIZIONI SUPERFICIALI	MOLTO BUONE	BUONE	COPRITE	SCALDATE
<p>Sulla base dell'aspetto della roccia, scegliere la categoria che si pensa da la migliore descrizione delle condizioni "reali" dell'ammasso roccioso presente in sito. Da notare che la superficie visibile della roccia ottenuta da una scava con esplosivo può dare una impressione fuorviante sulla qualità della roccia sottostante. Cionon pertanto, con ogni opportunità la valutazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso per tenere in conto il disturbo arrecato dallo scavo con esplosivo. A questo riguardo può essere utile l'esame di carotaggi ottenuti da perforazioni a circolazione continua con corone diamantate o l'osservazione della superficie creata da uno scavo realizzato con tecniche di accensione controllata. È inoltre importante ricordare che il grado di rottura di Hoek-Brown dovrebbe essere applicato dove la dimensione del "volume unitario" di ammasso roccioso risulta piccola in confronto alle dimensioni dello scavo in considerazione.</p>	<p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abata.</p> <p>BUONE: Superficie scabra, leggermente alterata, ossidata.</p> <p>COPRITE: Superficie liscia, moderatamente alterata.</p> <p>SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e fratture, completa o costituita da fratture e fratture.</p> <p>MOLTO BUONE: Superficie molto scabra con fratture di riempimento costituito da argille tenere.</p>				
<p>STRUTTURA</p> <p>A BLOCCHI - Ammasso roccioso indisturbato costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutuo incastro.</p> <p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disturbato con blocchi angolari, mutualmente incastriati, con più sfaccettature formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p> <p>A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p> <p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.</p>	<p>CONDIZIONI SUPERFICIALI</p> <p>MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abata.</p> <p>BUONE: Superficie scabra, leggermente alterata, ossidata.</p> <p>COPRITE: Superficie liscia, moderatamente alterata.</p> <p>SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e fratture, completa o costituita da fratture e fratture.</p> <p>MOLTO BUONE: Superficie molto scabra con fratture di riempimento costituito da argille tenere.</p>				
<p>DIMENSIONE DEL GRADO DI MUTUO INCASTRO DELL'AMMASSO ROCCIOSO</p> <p>BVG B/G B/F B/P B/VP</p> <p>VBVG VB/G VBF VB/P VB/VP</p> <p>BDVG BD/G BDF BD/P BD/VP</p> <p>DVG D/G D/F D/P D/VP</p>	<p>DIMENSIONE DEL GRADO DI MUTUO INCASTRO DELL'AMMASSO ROCCIOSO</p> <p>80</p> <p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p>				

Figura 17 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

Sulla base di queste caratteristiche si ottengono i seguenti valori di mb , s , a :

$$mb = mi [(GSI-100)/28]$$

$$s = e [(GSI-100)/(9-3D)]$$

$$a = 0,5 \text{ (per GSI > 25)}$$

tramite i quali si stimano coesione e angolo di attrito interno secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb:

$$\sigma'1 = (2c' \cos \phi' / 1 - \sin \phi') + (1 + \sin \phi' / 1 - \sin \phi') \sigma'3$$

I valori coesione e di angolo di attrito interno ottenuti attraverso l'applicazione di tale classificazione sono in generale rispondenti alla tipologia litologica interessata.

È utile sottolineare che esistono delle correlazioni dirette fra i valori di GSI e il valore RMR del sistema di classificazione di Bieniawski

TIPO DI ROCCIA	CLASSE	GRUPPO	TESSITURA			
			GROSSOLANA	MEDIA	FINE	MOLTO FINE
SEDIMENTARIE	Clastiche		Conglomerato (22)	Arenaria 19 Grovacche (18)	Siltite 9	Argillite 4
	Non clastiche	Organogene		Calcare bianco (7) Carbone (8-21)		
		Carbonatiche	Breccia(20)	Calcare Sparitico (10)	Calcare Micritico 8	
		Chimiche		Gesso 16	Anidride 13	
METAMORFICHE	Non foliate		Marmo 9	Hornfels (19)	Quarzite 24	
	Leggermente foliate		Migmatite (30)	Anfibolite 25-31	Miloniti (6)	
	Foliate*		Gneiss 33	Scisti 4-8	Filliti (10)	Scisti argillosi 9
IGNEE	Chiare		Granito 33		Riolite (16)	Ossidiana (19)
	Scure		Granodiorite (30)		Dacite (17)	
			Diorite (28)		Andesite 19	
		Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalto (17)		
		Norite 22				
	Effusive piroclastiche		Agglomerato (20)	Breccia (18)	Tufo (15)	

Questi valori sono validi per campioni di roccia intatta portati a rottura applicando il carico normale alla stratificazione o scistosità. Il valore di m, sarà sensibilmente inferiore se la rottura avviene lungo un piano di debolezza

Figura 18 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia

L'analisi delle caratteristiche geomeccaniche in sito degli ammassi rocciosi interessati dal progetto e l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso ha portato alla classificazione di nr.1 **tipologia** tra le litologie che caratterizzano le formazioni presenti, appartenente alla **Unità del Monte Frusciu**.

Per il calcolo degli indici e della relativa trasformazione in parametri di coesione e angolo di attrito interno secondo Mohr- Coulomb è stato utilizzato il software RocData vers.3.0 della Rocscience Inc.

<p>Criterio di rottura empirico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{u(r)}\sigma_3 + s\sigma_{u(r)}^2}$ <p>σ_1 = tensione efficace principale massima σ_3 = tensione efficace principale minima $\sigma_{u(r)}$ = resistenza a compressione monoassiale m ed s: costanti empiriche</p>	COSTANTI DEL MATERIALE: m, s	ROCCIE CARBONATICHE CON CLIVAGGIO CRISTALLINO BEN SVILUPPATO <i>Dolomite, calcare e marmo.</i>	ROCCIE ARGILLOSE LITIFICATE <i>Argille, siltite, scisti argillosi con clivaggio ben marcato.</i>	ROCCIE ARENACEE CON ELEVATA CRISTALLIZZAZIONE E LIMITATO SVILUPPO DI CLIVAGGIO PER CRISTALLIZZAZIONE <i>Arenarie e quarzite</i>	ROCCIE CRISTALLINE IGNEE E GRANA FINE <i>Andesite, dolerite, diabase e riolite</i>	ROCCIE IGNEE A GRANA GROSSOLANA E ROCCIE CRISTALLINE METAMORFICHE <i>Amfibolite, gabbro, gneiss, novite, quarzo-clorite</i>
<p>CAMPIONI DI ROCCIA INTATTA</p> <p><i>Campioni di laboratorio senza discontinuità (matrice rocciosa)</i></p> <p>Indice CSIR: RMR = 100 Indice NGI: Q = 500</p>	m s	7.00 1.00	10.00 1.00	15.00 1.00	17.00 1.00	25.00 1.00
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI OTTIMA QUALITÀ</p> <p><i>Ammasso roccioso indisturbato con giunti non alterati di spaziatura compresa fra 1 e 3 m</i></p> <p>Indice CSIR: RMR = 65 Indice NGI: Q = 100</p>	m s	2.40 0.082	3.43 0.062	5.14 0.082	5.82 0.082	8.56 0.062
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ</p> <p><i>Roccia sana o leggermente alterata, leggermente disturbato con giunti di spaziatura compresa fra 1 e 3 m.</i></p> <p>Indice CSIR: RMR = 65 Indice NGI: Q = 10</p>	m s	0.575 0.00293	0.821 0.00293	1.231 0.00293	1.395 0.00293	2.052 0.00293
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI DISCRETA QUALITÀ</p> <p><i>Numerose famiglie di giunti moderatamente alterati, con spaziature comprese fra 0.3 e 1 m.</i></p> <p>Indice CSIR: RMR = 44 Indice NGI: Q = 1</p>	m s	0.128 0.00009	0.183 0.00009	0.275 0.00009	0.311 0.00009	0.458 0.00009
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ SCADENTE</p> <p><i>Numerosi giunti alterati con spaziatura compresa fra 30 e 500 mm, alcuni con riempimento. Detrito di roccia pulita compattata.</i></p> <p>Indice CSIR: RMR = 23 Indice NGI: Q = 0.1</p>	m s	0.029 0.000003	0.041 0.000003	0.061 0.000003	0.069 0.000003	0.102 0.000003
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ MOLTO SCADENTE</p> <p><i>Numerosi giunti molto alterati con spaziatura inferiore a 50 mm e con riempimento. Detrito di roccia con materiale fine.</i></p> <p>Indice CSIR: RMR = 3 Indice NGI: Q = 0.01</p>	m s	0.007 0.0000001	0.010 0.0000001	0.015 0.0000001	0.017 0.0000001	0.025 0.0000001

CSIR (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) Organizzazione Scientifica ed Industriale di Ricerca (Bieniawski 1974)
NGI Norway Geotechnical Institute (Barton 1974)

Figura 19 Correlazione fra valori di m, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.

Di seguito si riportano gli schemi di analisi degli ammassi rocciosi e i relativi diagrammi di Mohr –Coulomb, in base alle osservazioni su campo e unitamente ai dati ottenuti dalle prospezioni geofisiche, si è ipotizzata una variazione del grado di fratturazione del substrato al variare della profondità divisa in **5 strati**, che vanno dalle “terre debolmente addensate” al “substrato roccioso sano”.

Nello specifico: nel livello S1, che come da descrizione sulla relazione geofisica viene indicato come “terre debolmente addensate”, è stato considerato un valore estremamente basso di sgci (valore indicativo della resistenza a compressione uniassiale) poiché non si tratta di un materiale litoide.

Nei livelli S2 e S3 l’sgci è stato riportato come da osservazioni e classifica speditiva di campo in base al fatto che “il campione di roccia si rompe con pochi colpi di martello” (rif. Fig.16).

Nei livelli S4 e S5 il valore sgci cresce poiché si passa gradualmente dalla roccia fratturata al substrato roccioso sano e inalterato. Il secondo valore che varia al variare della profondità è il GSI, tale valore dà indicazioni sullo stato di fratturazione della roccia, in questo caso unicamente nel livello S1 non si è tenuto conto di questo valore poiché trattasi di terre sciolte, mentre dal livello S2 al livello S5 si passa da “disintegrated” a “intact or massive”(rif Fig.17). *Si tratta di valori stimati in base a indagini indirette e a osservazioni su campo, pertanto da confermare puntualmente in fase di progettazione esecutiva.*

Unità del Monte Frusci

Standard ISRM = R4 Un campione richiede pochi colpi di martello per essere fratturato

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= da mediamente fratturato a molto fratturato

Struttura= stratificata

Alterazione= mediamente alterata

Spaziatura totale delle discontinuità (s)=0,1 m

Lunghezza media del giunto = >3 m

Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – asciutta

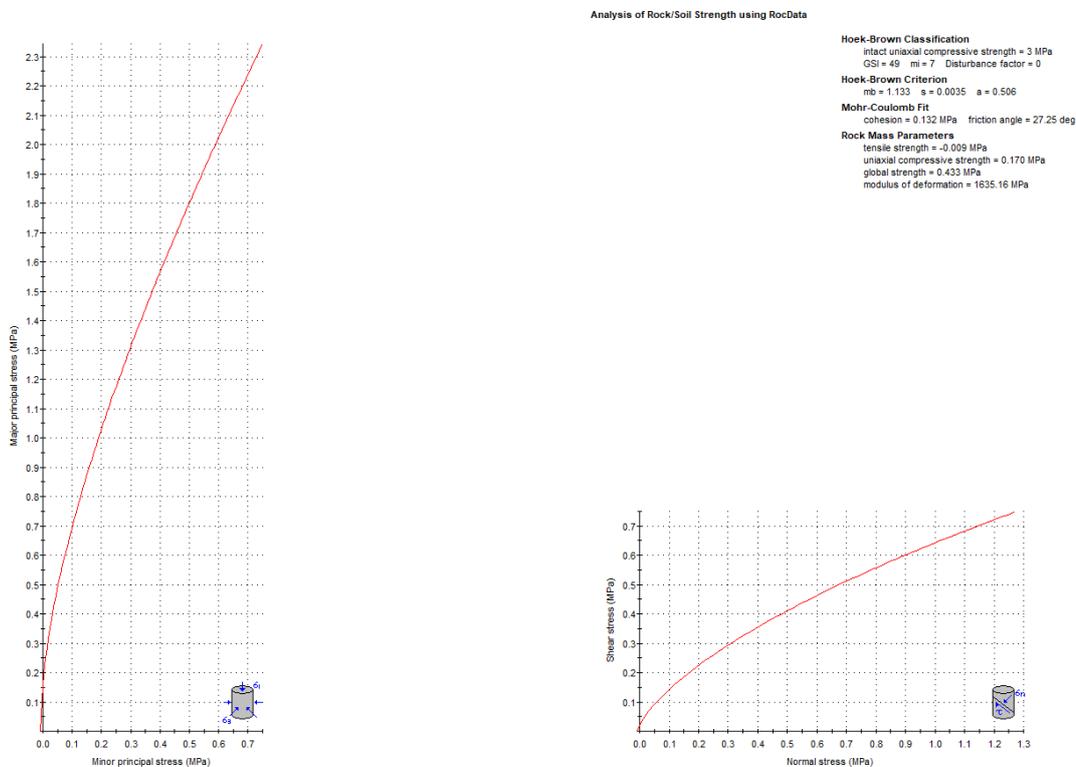
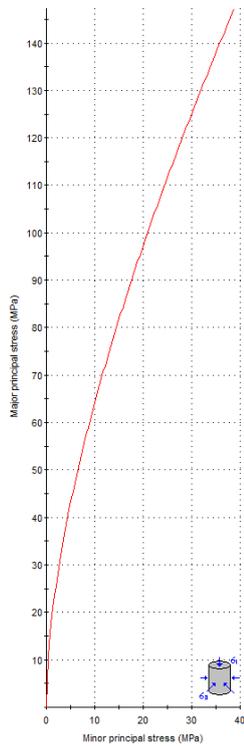


Figura 20 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S1

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 50 MPa
GSI = 40 m = 50 Disturbance factor = 0

Hoek-Brown Criterion
mb = 5.866 s = 0.0013 a = 0.511

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 7.738 MPa friction angle = 32.06 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.011 MPa
uniaxial compressive strength = 1.854 MPa
global strength = 15.707 MPa
modulus of deformation = 3976.35 MPa

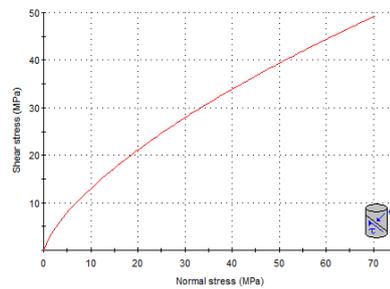
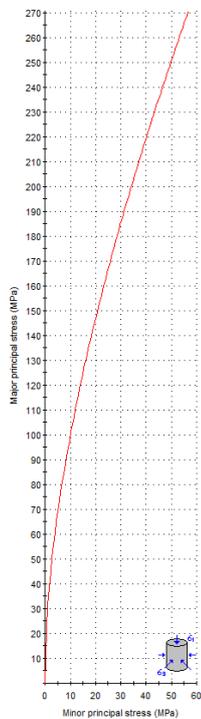


Figura 21 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S2

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 50 MPa
GSI = 68 m = 50 Disturbance factor = 0

Hoek-Brown Criterion
mb = 15.945 s = 0.0286 a = 0.502

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 14.230 MPa friction angle = 36.95 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.090 MPa
uniaxial compressive strength = 8.403 MPa
global strength = 27.218 MPa
modulus of deformation = 19928.98 MPa

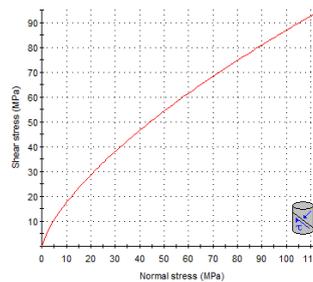


Figura 22 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S3

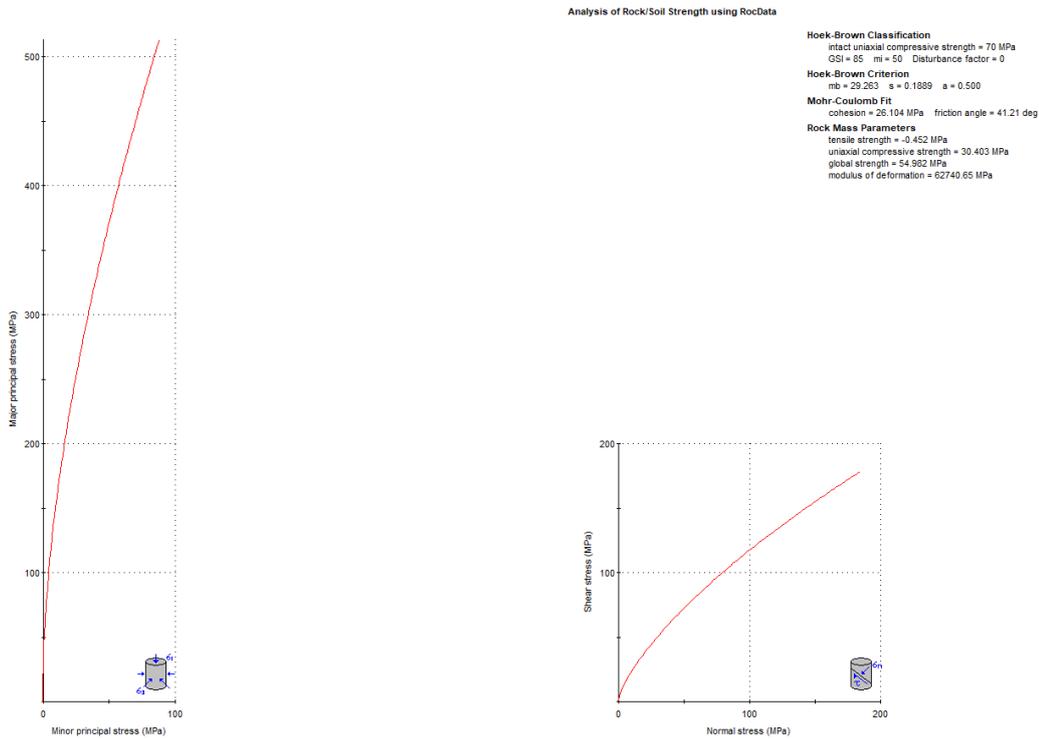


Figura 23 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S4

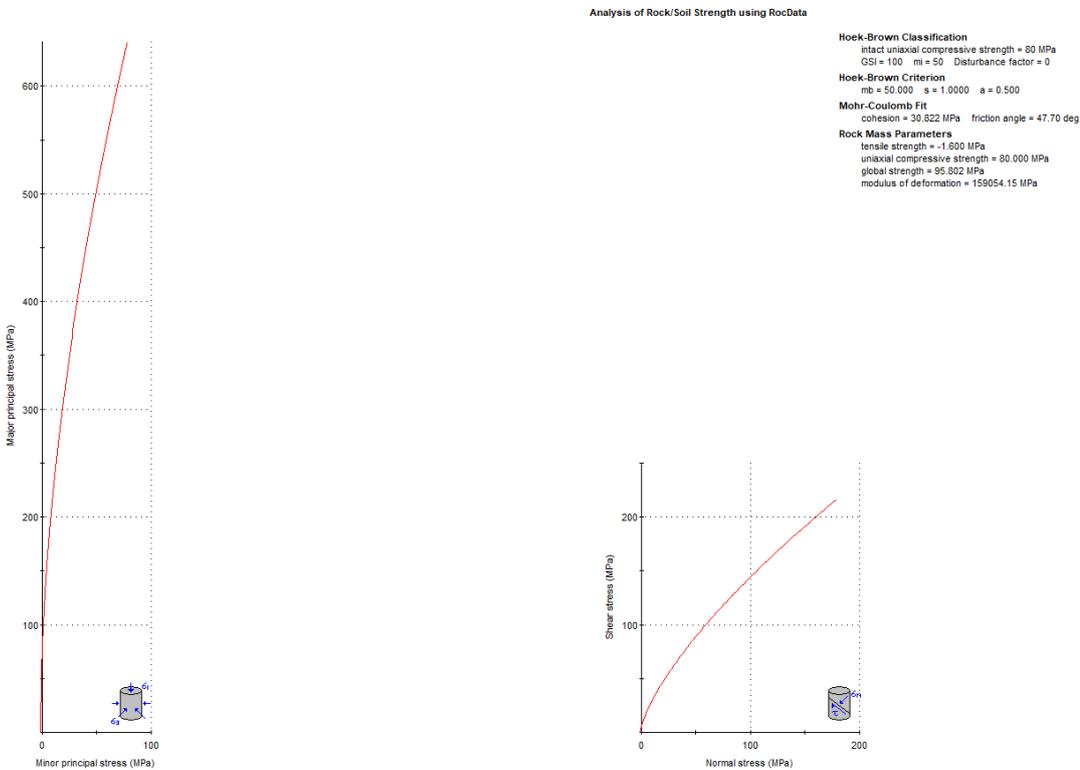


Figura 24 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData per il livello S5

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 56 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

10. Modello geologico di sito

Sulla base di quanto emerso dai rilievi e dalle indagini in sito, nell'approccio progettuale, stante il contesto geologico si evidenziano le seguenti criticità a cui sarà necessario prestare la opportuna attenzione nella progettazione esecutiva dell'opera e nelle varie fasi di realizzazione.

L'analisi di tali fattori è funzionale alla progettazione e ha lo scopo di valutare la risposta del terreno ai nuovi carichi ed individuare azioni correttive o accorgimenti tali da limitarne gli effetti. Nello specifico:

1. Azioni sulle pareti e stabilità dei fronti. Lo scavo stesso, in quanto genera depressione, può innescare locali smottamenti in corrispondenza degli orizzonti meno competenti a causa di fenomeni di detensionamento determinati dall'asportazione del materiale durante l'escavazione, sia in relazione ai livelli meno competenti sia alle direzioni del sistema di fratturazione che può generare componenti a franapoggio. La profonda deformazione che le metamorfite hanno subito genera variazioni di giacitura anche nell'ordine del metro pertanto si ritiene importante in fase di realizzazione degli scavi di fondazione eseguire un dettagliato rilievo geostrutturale finalizzato all'esclusione di ogni possibile rischio di crollo e/o slittamento di porzioni di parete.
2. Circolazione idrica sotterranea secondaria o indotta e/o stagnazione di acque di pioggia – pur se non è stata rilevata in fase di indagine, vanno considerati gli effetti dell'eventuale presenza d'acqua alla quota di imposta delle fondazioni in relazione ad una possibile circolazione idrica indotta dai fenomeni di detensionamento dovuti agli scavi, con particolare riferimento alla stagionalità degli apporti idrici e del relativo flusso negli ambiti più superficiali. In tal caso, in fase esecutiva, sarà opportuno provvedere a mantenere lo scavo asciutto mediante l'installazione di pompe adeguatamente dimensionate per la portata da emungere.

L'analisi ha permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, è stato individuato **nr.1 modello geologico rappresentativo** descritto di seguito:

Modello Geologico 01

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati degli stendimenti geofisici SMT01, SMT02 e SMT03 e i dati dei rilievi geomeccanici "Scanline-1" e "Scanline-2".

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di circa 1,6m in terre debolmente addensate si incontra un livello superficiale di roccia fratturata dallo spessore di circa 2,5m, il sottostante substrato roccioso fratturato prosegue fino ad una profondità di circa 2,5 m arrivando a profondità che possono variare dai 6m ai 9m da piano campagna. Da circa 6m-9m da piano campagna fino a circa 17m il substrato roccioso passa da fratturato a sano.

Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta stratificata, e, pur mediamente resistente, è debolmente affetta da alterazione fisica. La spaziatura massima tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,3 m, la minima è 0,1m. Sono state rilevate diverse famiglie di giunti, ma la principale è sicuramente quelle influenzata dalle direzioni di flusso durante la messa in posto.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da range abbastanza ridotti e valori di resistività generalmente medio bassi. Nelle varie sezioni si sono messe in evidenza delle anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione, che nel contesto in esame possono essere interpretate come dei settori caratterizzati dalla presenza di materiale maggiormente alterato (argillificazione)/fratturato rispetto alla roccia adiacente e/o alla presenza d'acqua. Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 57 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

- 00.00m - 1.60m Terre debolmente addensate
- 01.60m - 4.10m Roccia fratturata
- 04.10m – 7.50m Substrato roccioso fratturato**
- 7.50m – 17.00 Substrato roccioso da fratturato a sano
- 17.00m – in poi Substrato roccioso sano

Thiesi - MODELLO GEOLOGICO 01						
Dati Parametri Resistenza						
Tipo di Terreno		S1- Terre debolmente addensate	S2 – Roccia fratturata	S3 – Substrato roccioso fratturato	S4- Substrato roccioso da fratturato a sano	S5 – Substrato roccioso sano
Descrizione						
Peso di volume	[kg/mc]	1650	1850	2000	2200	2300
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1750	1950	2100	2300	2400
Angolo di attrito interno	[°]	27,25	32,06	36,95	41,21	47,70
Coesione	[Mpa]	0,132	7,738	14,230	26,104	30,822
Dati Parametri Deformabilità						
Modulo elastico	[Mpa]	750	2450	5400	12000	22000
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	200	700	2000	4500	9500
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	500	700	900	1400	1900

11. Descrizione dell'opera di fondazione degli aerogeneratori

Il dimensionamento preliminare, in attesa della scelta progettuale del committente, tiene conto del modello tipologico di aerogeneratore descritto in premessa.

In questa fase si prevede la realizzazione di opere di fondazione di tipo diretto costituite da un plinto con forma tronco-conica, con pianta circolare avente diametro massimo pari a 25,00 m ed una sezione trapezia avente altezza minima al bordo esterno pari a 0,50, altezza di 2,50m nel profilo della connessione della parte tronco-conica con il colletto centrale dove raggiunge i 3,50m d'altezza.

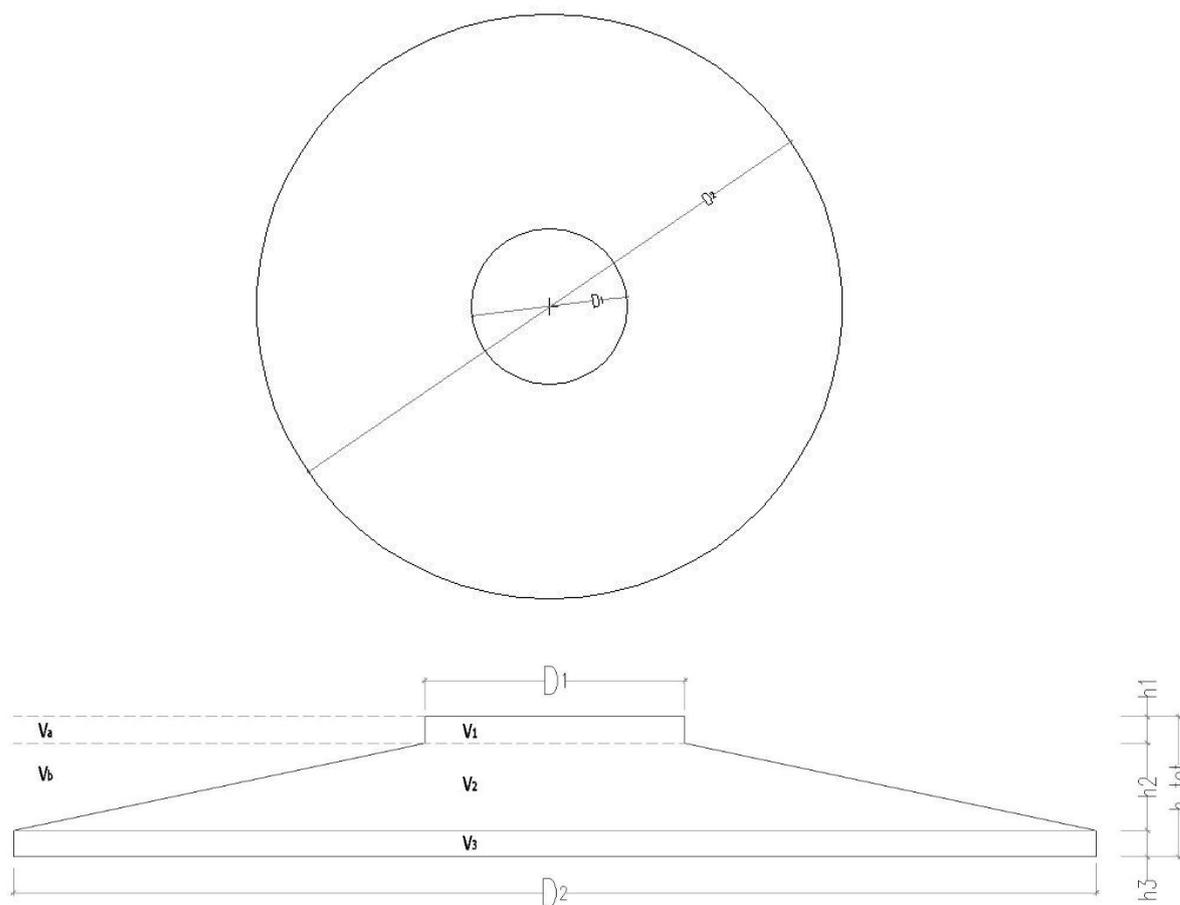


Figura 25 - Caratteristiche geometriche della fondazione

DATI GEOMETRICI FONDAZIONE:

diametro colletto =	$d_1 = 6,00 \text{ m}$
diametro esterno =	$d_2 = 25,00 \text{ m}$
altezza colletto =	$h_1 = 0,50 \text{ m}$
altezza intermedia =	$h_2 = 2,50 \text{ m}$
altezza alla base =	$h_3 = 0,50 \text{ m}$
altezza totale =	$h_{\text{tot}} = 3,50 \text{ m}$

12. Azioni e resistenze nelle verifiche agli stati limite

La nuova normativa sulle costruzioni prevede i coefficienti parziali γ_F relativi alle azioni indicati nella Tab. 6.2.I. Ad essi deve essere fatto riferimento con le precisazioni riportate nel § 2.6.1 delle NTC. Si deve comunque intendere che il terreno e l'acqua costituiscono carichi permanenti (strutturali) quando, nella modellazione utilizzata, contribuiscono al comportamento dell'opera con le loro caratteristiche di peso, resistenza e rigidità.

Nella valutazione della combinazione delle azioni i coefficienti di combinazione ϕ_{ij} devono essere assunti come specificato nel Cap. 2.

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Nel caso specifico di fondazioni superficiali come quella in progetto [6.4.2] “si considerano azioni sull'opera di fondazione quelle dovute al peso proprio del terreno e del materiale di riempimento, ai sovraccarichi, all'acqua, ad eventuali ancoraggi presollecitati, ad urti e collisioni, alle variazioni di temperatura e al ghiaccio.

Per quanto concerne i sovraccarichi si deve tener conto della eventuale presenza di costruzioni, di depositi di materiale, di veicoli in transito, di apparecchi di sollevamento.

Il valore di progetto della resistenza R_d può essere determinato:

- in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale γ_M specificato nella successiva Tab. 6.2.II e tenendo conto, ove necessario, dei coefficienti parziali γ_R specificati nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;
- in modo analitico, con riferimento a correlazioni con i risultati di prove in sito, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;
- sulla base di misure dirette su prototipi, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera.

Per le rocce, al valore caratteristico della resistenza a compressione uniaassiale q_u deve essere applicato un coefficiente parziale $\gamma_{qu}=1,6$. Per gli ammassi rocciosi e per i terreni a struttura complessa, nella valutazione della resistenza caratteristica occorre tener conto della natura e delle caratteristiche geometriche e di resistenza delle discontinuità strutturali.

Nello specifico, la normativa evidenzia anche che ...[6.2.4] nei casi in cui a causa della particolare complessità della situazione geotecnica e dell'importanza e impegno dell'opera, dopo estese ed approfondite indagini permangano documentate ragioni di incertezza risolvibili solo in fase costruttiva, la progettazione può essere basata sul metodo osservazionale.

Nell'applicazione di tale metodo si deve seguire il seguente procedimento:

- devono essere stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
- si deve dimostrare che la soluzione prescelta è accettabile in rapporto a tali limiti;

3. devono essere previste soluzioni alternative, congruenti con il progetto, e definiti i relativi oneri economici;
4. deve essere istituito un adeguato sistema di monitoraggio in corso d'opera, con i relativi piani di controllo, tale da consentire tempestivamente l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.

13. Verifiche di sicurezza (§6.4.2)

VERIFICHE DI SICUREZZA AGLI SLU DI TIPO GEOTECNICO (GEO) (§6.4.2.1)

Gli stati limite ultimi delle fondazioni superficiali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione stessa.

Nel caso di fondazioni posizionate su o in prossimità di pendii naturali o artificiali deve essere effettuata la verifica anche con riferimento alle condizioni di stabilità globale del pendio includendo nelle verifiche le azioni trasmesse dalle fondazioni.

Le verifiche devono essere effettuate almeno nei confronti dei seguenti stati limite:

1. SLU di tipo geotecnico (GEO)
2. collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno
3. collasso per scorrimento sul piano di posa
4. stabilità globale
5. SLU di tipo strutturale (STR)
6. raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali,

accertando che la condizione (6.2.1) sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata secondo l'Approccio 1:

- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tabella 6.8.I per le resistenze globali.

La rimanenti verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tab. 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I, seguendo almeno uno dei due approcci:

Approccio 1:

- Combinazione 1: (A1+M1+R1)

- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2:

(A1+M1+R3).

Nelle verifiche effettuate con l'approccio 2 che siano finalizzate al dimensionamento strutturale, il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto.

Nel caso in esame le verifiche dovranno essere condotte secondo l'approccio 1 combinazione 2.

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali.

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,8$	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$	$\gamma_R = 1,1$

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 61 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

VERIFICHE DI ESERCIZIO (SLE) (§C6.4.2.2)

Si devono calcolare i valori degli spostamenti e delle distorsioni per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione (§§ 2.2.2 e 2.6.2), nel rispetto della condizione (6.2.7).

Analogamente, forma, dimensioni e rigidità della struttura di fondazione devono essere stabilite nel rispetto dei già menzionati requisiti prestazionali, tenendo presente che le verifiche agli stati limite di esercizio possono risultare più restrittive di quelle agli stati limite ultimi.

Si fa notare come la scelta di valori dei parametri geotecnici "cautelativi" in mancanza di indagini dirette su ogni singolo aerogeneratore potrebbe sottostimare la capacità portante dei terreni di imposta. E' quindi opportuno, in fase esecutiva disporre un accurato piano di indagini localizzato sulle singole postazioni.

14. Condizioni di carico delle fondazioni degli aerogeneratori

Nella fase di predimensionamento sono stati utilizzati i carichi agenti sulle fondazioni ricavati specifiche tecniche rese disponibili dalla Società Vestas Wind che si riportano di seguito

Characteristic Extreme							
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
Mbt	14Ecdvraa00(fam89)	1.35	Abs	147900	3222	1142	-6853
Mzt	23NTMSCHWO100(fam216)	1.35	Abs	43280	-16550	475.0	-6595
FndFr	1314etm00(fam81)	1.35	Abs	127100	-2004	1252	-6863
Fzt	12IceUHWO100(fam70)	1.35	Abs	67050	-2263	502.1	-7071

I carichi forniti da Vestas Wind come "Extreme load" sono i carichi statici massimi per la specifica turbina eolica calcolati per qualsiasi condizione.

15. Modelli geotecnici di riferimento per le verifiche

Le verifiche sono state eseguite sul modello geotecnico 01 caratteristico per tutto il sito. Il piano di appoggio del basamento di fondazione è stato ipotizzato sullo **Strato n. 03**, substrato roccioso fratturato, a quota pari a circa -4.00 m, considerando che gli strati superficiali saranno rimossi dalle attività di scavo; si rimanda alle successive fasi della progettazione la valutazione dei dati puntuali per ogni singola piazzola di installazione.

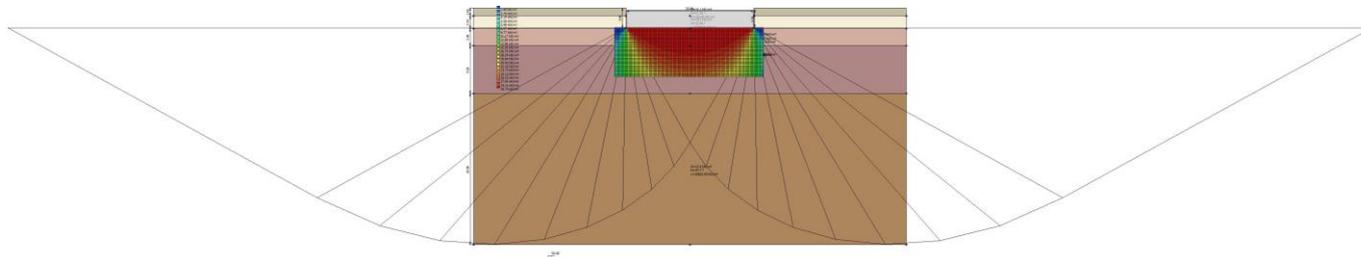
È stato utilizzato il software Loadcap 2022 della GEOSTRU. La fondazione è stata schematizzata come una piastra circolare dello spessore pari all'altezza delle due fondazioni proposte, in quanto il programma non permette l'inserimento di plinto circolare a sezione tronco-conica, con un leggero surplus di carico dovuto al differente peso tra c.a. e terreno di riporto.

In tutte le casistiche analizzate la fondazione proposta risulta verificata.

Si riporta di seguito la sintesi delle analisi effettuate e si rimanda all'**Allegato 1 - Relazione di calcolo** allegata alla presente per le specifiche di ogni caso analizzato.

La scelta di valori dei parametri geotecnici “cautelativi”, in mancanza di indagini dirette su ogni singolo aerogeneratore, potrebbe sottostimare la capacità portante dei terreni di imposta. E’ quindi opportuno, in fase esecutiva disporre un accurato piano di indagini localizzato sulle singole postazioni.

1. Modello Geotecnico 01



DATI GENERALI

Normativa NTC_2018
 Zona Thiesi
 Lat./ Long. [WGS84] 40.5268630981445/8.72010517120361
 Diametro della fondazione 25.0 m
 Profondità piano di posa 4.0 m
 Profondità falda 50.0
 Sottofondazione...Sporgenza, Altezza 0.1/0.1 m
 Correzione parametri

SISMA

Accelerazione massima (amax/g) 0.031
 Effetto sismico secondo Paolucci, Pecker (1997)
 Coefficiente sismico orizzontale 0.0063

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

Tipo opera: 2 - Opere ordinarie
 Classe d'uso: Classe IV
 Vita nominale:50.0 [anni]
 Vita di riferimento: 100.0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: B
 Categoria topografica: T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	60.0	0.249	2.685	0.3
S.L.D.	101.0	0.307	2.73	0.307
S.L.V.	949.0	0.587	2.976	0.371
S.L.C.	1950.0	0.693	3.061	0.393

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 63 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.2988	0.2	0.0061	0.003
S.L.D.	0.3684	0.2	0.0075	0.0038
S.L.V.	0.7044	0.2	0.0144	0.0072
S.L.C.	0.8316	0.2	0.017	0.0085

STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore [m]	Peso unità di volume [kN/m ³]	Peso unità di volume saturo [kN/m ³]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m ²]	Coesione non drenata [kN/m ²]	Modulo Elastico [kN/m ²]	Modulo Edometrico [kN/m ²]	Poisson	Coeff. consolidaz. primaria [cmq/s]	Coeff. consolidazione secondaria	Descrizione
1.6	16.1	17.16	27.25	132.0	0.0	750000.0	0.0	0.33	0.0	0.0	S1
2.5	18.14	19.12	32.06	7738.0	0.0	2450000.0	0.0	0.33	0.0	0.0	S2
3.4	19.61	20.59	36.95	14230.0	0.0	5400000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S3
9.5	21.57	22.55	41.21	26104.0	0.0	12000000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S4
30.0	22.55	23.53	47.7	30822.0	0.0	22000000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S5

Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m ²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A2+M2+R2	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Progetto
2	Sisma	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Servizio
4	A(1)+M(2)+R(2)	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Progetto

Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coeff. Rid. Capacità portante verticale	Coeff. Rid. Capacità portante orizzontale
1	Si	1.25	1.25	1.4	1	1	1.8	1.1
2	Si	1.25	1.25	1.4	1	1	1.8	1.1
3	Si	1	1	1	1	1	1.8	1
4	Si	1.25	1	1.25	1	1	1.8	1

CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A2+M2+R2

Autore: Brinch - Hansen 1970

BENTU Energy Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesBen-CLP-CIV-TR-20	Rev 0	Pagina 64 di 65
------------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

Carico limite [Qult]	22907.51	kN/m ²
Resistenza di progetto[Rd]	12726.39	kN/m ²
Tensione [Ed] 92.0	kN/m ²	
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	248.99	

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler	916300.3	kN/m ³
---------------------	----------	-------------------

VERIFICA A SCORRIMENTO (A(1)+M(2)+R(2))

Adesione terreno fondazione	19.9	kN/m ²
Angolo di attrito terreno fondazione	0	°
Frazione spinta passiva	0	%
Resistenza di progetto	8206.04	kN
Sollecitazione di progetto	1252	kN

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

CEDIMENTI PER OGNI STRATO

*Cedimento edometrico calcolato con: Metodo consolidazione monodimensionale di Terzaghi

Pressione normale di progetto	92.0	kN/m ²
Cedimento dopo T anni	7.0	
Distanza	10.90	m
Angolo	201.18	°
Cedimento totale	0	cm

CEDIMENTI ELASTICI

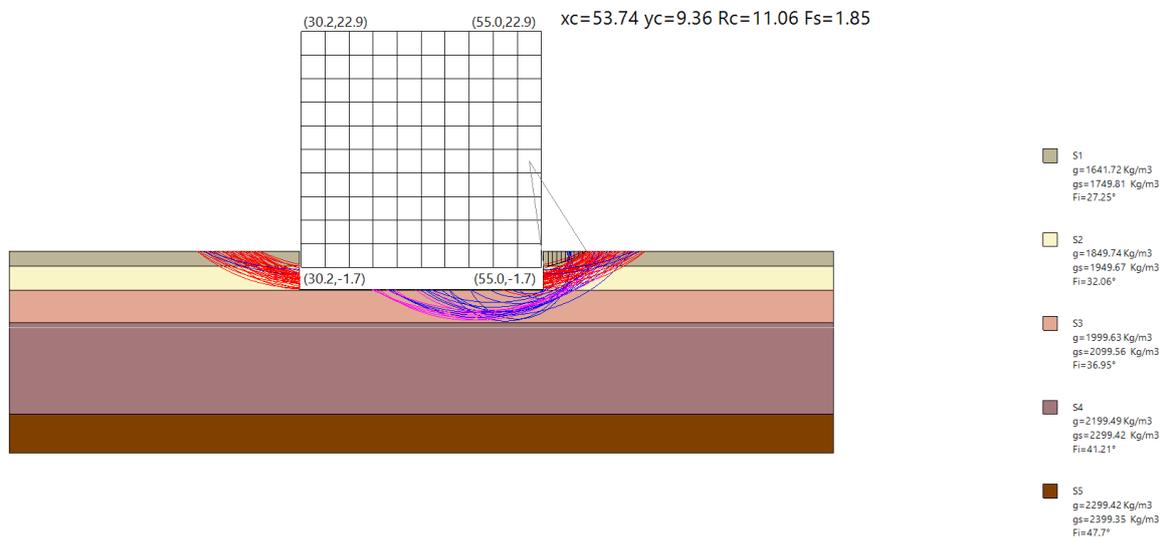
Pressione normale di progetto	92.0	kN/m ²
Spessore strato	5.0	m
Profondità substrato roccioso	10.0	m
Modulo Elastico	540000.0	kN/m ²
Coefficiente di Poisson	0.33	

Coefficiente di influenza I1	0.03	
Coefficiente di influenza I2	0.07	
Coefficiente di influenza Is	0.07	
Cedimento al centro della fondazione	0.12	mm

Coefficiente di influenza I1	0.01	
Coefficiente di influenza I2	0.04	
Coefficiente di influenza Is	0.03	
Cedimento al bordo	0.03	mm

16. FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6)

È stata eseguita una verifica di stabilità dei fronti di scavo della fondazione in ordine all'altezza di scavo prevista e alla tipologia di materiale attraversato considerando il modello geotecnico 01 e annullando la coesione simulando in questo modo gli effetti dello scavo.



In generale si hanno da localmente medie proprietà di autosostegno. Dato il grado di fratturazione presenti alle profondità investigate non si escludono fenomeni di detensionamento in fase di scavo con il possibile innesco di fenomeni gravitativi localizzati.

In fase esecutiva sarà opportuno verificare con indagini dirette le caratteristiche proprie dei terreni e valutare quindi l'opportunità di realizzare pareti di scavo inclinate e/o gradonate.